



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

LABORATORNÍ PŘÍPRAVEK PRO VÝUKU A DEMONSTRACI SBĚRNIC

LABORATORY TOOL FOR TEACHING AND DEMONSTRATING BUSES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Mutina

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Vladimír Levek, Ph.D.

BRNO 2020

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav mikroelektroniky

Student: Petr Mutina

ID: 203301

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Laboratorní přípravek pro výuku a demonstraci sběrnic

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a vytvořte laboratorní výukový přípravek, který bude umožňovat komunikaci po sběrnicích: SPI, UART, I2C, 1-Wire, CAN a RS485. Zařízení bude sloužit pro výuku a demonstraci průběhů na výše uvedených sběrnicích. Hlavní komponentou zařízení bude vhodný mikrokontrolér, který bude umožňovat komunikaci buď přímo, nebo pomocí budičů, či řadičů sběrnic. Zařízení bude zobrazovat na displeji vybrané stavy sběrnic, bude ovládáno pomocí tlačítek a bude umožněno měřit průběhy sběrnic na osciloskopu, popřípadě je snímat pomocí logického analyzátoru.

Zařízení navrhněte, realizujte, proveďte závěrečná měření zkušebního provozu a navrhněte několik laboratorních cvičení. Všechny body návrhu, realizace a provozu popište v textové části bakalářské práce.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 8.6.2020

Vedoucí práce: Ing. Vladimír Levek, Ph.D.

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce si klade za cíl návrh a realizaci laboratorního přípravku vhodného pro výuku a demonstraci jednoduchých sběrnic (jmenovitě UART, RS-485, I2C, SPI, 1-Wire, CAN, proudová smyčka a IČ přenos). I když existuje více možností přenosu signálu, tato práce se zabývá pouze metalickými sběrnicemi. Výjimku tvoří možnost přenosu dat pomocí infračerveného světla jako příklad bezdrátové optické komunikace. Nejprve jsou definovány základní pojmy a popsány použité technologie, dále je proveden obvodový návrh laboratorního přípravku, nakonec je popsána jeho realizace a testování.

KLÍČOVÁ SLOVA

UART, RS-485, I2C, SPI, 1-Wire, CAN, proudová smyčka, IČ přenos

ABSTRACT

The goal of this bachelor thesis is laboratory tool design and realization, which is suitable for teaching and demonstrations simple buses (UART, RS-485, I2C, SPI, 1-Wire, CAN, current loop and IR transmission). Despite the fact there are many possibilities of signal transmission, this thesis deals with metallic buses only. The only exception is infrared light data transmission, that was added as an example of optical wireless communication. First, basic terms are defined and used technologies are described, then circuit design is made, finally, laboratory tool is made and tested.

KEYWORDS

UART, RS-485, I2C, SPI, 1-Wire, CAN, current loop, IR transmission

MUTINA, P. *Laboratorní přípravek pro výuku a demonstraci sběrnic.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 2020. 61 s., 9 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Vladimír Levek, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: Petr Mutina

VUT ID studenta: 203301

Typ práce: Bakalářská práce

Akademický rok: 2019/20

Téma závěrečné práce: Laboratorní přípravek pro výuku a demonstraci sběrnic

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **1. června 2020**

.....
podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Vladimíru Levkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne **1. června 2020**

.....

podpis autora

OBSAH

Úvod.....	1
1 Teoretický rozbor tématu	3
1.1 Základní pojmy	3
1.1.1 Simplexní a duplexní sběrnice	3
1.1.2 Paralelní a sériový přenos dat.....	4
1.1.3 Přenosová rychlost	4
1.1.4 Metody detekce chybného přenosu dat	5
1.1.5 Zapojení výstupních pinů digitálních obvodů.....	5
1.1.6 Řízení přístupu na sběrnici	7
1.2 Použité sběrnice.....	7
1.2.1 Sběrnice UART	7
1.2.2 Sběrnice RS-485.....	8
1.2.3 Sběrnice I2C	11
1.2.4 Sběrnice SPI	13
1.2.5 Sběrnice 1-Wire.....	15
1.2.6 Sběrnice CAN	18
1.2.7 Proudová smyčka	20
1.2.8 Infračervený přenos dat	21
2 Obvodový návrh laboratorního přípravku	23
2.1 Napájení	24
2.2 Mikrokontrolér	26
2.3 Uživatelské rozhraní.....	28
2.4 Sběrnice	31
3 Realizace laboratorního přípravku.....	38
3.1 Návrh a výroba desky plošných spojů.....	38
3.2 Osazení desky plošných spojů a oživení	40
3.3 Ověření funkčnosti laboratorního přípravku	41

4	Návrh laboratorních úloh	49
5	Závěr	52
	Literatura	53
	Seznam obrázků	57
	Seznam tabulek.....	59
	Seznam zkratek	60
A	Schéma zapojení.....	62
A.1	List 1.....	62
A.2	List 2.....	63
A.3	List 3.....	64
A.4	List 4.....	65
B	Seznam součástek.....	66
C	Deska plošných spojů	70
C.1	Horní strana	70
C.2	Spodní strana	70

ÚVOD

V dnešní době se těžce hledá obor lidské činnosti, do kterého alespoň okrajově nezasahuje elektrotechnika. Současné elektrické spotřebiče se skládají z mnoha složitých obvodů, které umožňují jejich napájení, řízení a realizují komunikaci. K interakci s jejich okolním většinou slouží rozmanité druhy snímačů, akčních členů a komunikačních protokolů. Přírozeným příkladem může být samotný člověk. Za snímače lze považovat orgány smyslového vnímání, za řídicí jednotu centrální nervovou soustavu, za akční členy pohybová ústrojí a za komunikační protokol prostředky verbální i neverbální komunikace.

I díky rozmachu Internetu věcí (Internet of Things – IoT) je v poslední době celkem snadné být svědkem toho, že se různé přístroje, u kterých by to ještě před pár lety téměř nikdo neočekával, vybavují komunikačními moduly. Jako příklad lze uvést RFID klíčenky, Wi-Fi moduly v pračkách a Bluetooth moduly v kávovarech. Komunikaci lze realizovat jak na malé vzdálenosti, například po fyzické sběrnici na desce plošného spoje nebo rovnou uvnitř křemíkového čipu, tak na velké vzdálenosti – rádiové spojení mezi anténou na Zemi a Mezinárodní vesmírnou stanicí na oběžné dráze Země. Protokoly bývají vybaveny prostředky, které umožňují zprávu zakódovat či detekovat správnost přijaté informace, popřípadě využívají samoopravných kódů.

S rozmachem informačních a komunikačních technologií se značně zvýšil životní komfort. Zdoluhavé bádání v knihovnách dnes téměř nahradilo fultextové vyhledávání na internetu. Je možné zobrazit si zprávy z celého světa v téměř reálném čase, lze komunikovat s kýmkoliv, ať už je kdekoliv. Na druhou stranu se na každého z nás valí takové množství informací jako například obtěžující nevyžádané reklamy, že je užitečné naučit se jisté informační gramotnosti. Zejména dezinformace (fake news) jsou dnes jedním z nástrojů politického boje. Dalším potenciálně nebezpečným jevem je takzvaný data mining, kdy lze z určitých vzorců chování uživatele na internetu odhalit některé osobní informace. Výsledkem může být například cílení reklam.

Realizace komunikačních kanálů je poměrně složitá a komplexní disciplína, která vyžaduje spolupráci odborníků z různých oborů. Tato bakalářská práce si klade za cíl návrh a realizaci laboratorního přípravku vhodného pro výuku a demonstraci jednoduchých sběrnic (jmenovitě UART, RS-485, I2C, SPI, 1-Wire, CAN, proudová smyčka a IČ přenos). I když existuje více možností přenosu signálu, tato práce se zabývá pouze metalickými sběrnici. Výjimku tvoří možnost přenosu dat pomocí infračerveného světla jako příklad bezdrátové optické komunikace.

V první kapitole jsou vymezeny základní pojmy, se kterými se v tomto dokumentu dále pracuje. Konkrétně definice toho, co je to signál, simplexní a duplexní sběrnice, paralelní a sériový přenos dat a přenosová rychlost. Následně je stručně popsáno obvodové řešení některých sběrnic, řízení přístupu jednotlivých zařízení ke sběrnicím a metody detekce chybného přenosu dat. Dále jsou definovány a popsány použité technologie (viz předchozí

odstavec). V následujících dvou kapitolách je proveden kompletní obvodový návrh laboratorního přípravku, je zde popsána i jeho výroba a oživení včetně testování. Závěrem (kapitola čtvrtá) je uvedena realizace laboratorních úloh.

1 TEORETICKÝ ROZBOR TÉMATU

Následující část textu se věnuje vymezení základních pojmů, konkrétně je definováno, co je to signál, simplexní a duplexní sběrnice, paralelní a sériový přenos dat a přenosová rychlost. Dále je stručně popsáno obvodové řešení některých sběrnic, řízení přístupu jednotlivých zařízení ke sběrnicím a metody detekce chybného přenosu dat. Následně jsou definovány a popsány použité technologie (UART, RS-485, I2C, SPI, 1-Wire, CAN, proudová smyčka a IČ přenos).

1.1 Základní pojmy

Signál je fyzikální veličina nesoucí informaci [1]. Je jím například elektrické napětí nebo elektrický proud. Při analogovém přenosu dat může nabývat signál libovolné hodnoty a může se měnit libovolně s časem (analogová proudová smyčka) [2] [3]. Diskrétní signál může být buď diskrétní v čase a měnit se tedy pouze v určitých okamžicích (informace o intenzitě jednotlivých barevných složek světla pixelu ve VGA rozhraní) nebo diskrétní v amplitudě a nabývat tedy jen omezeného počtu hodnot. Pokud je signál diskrétní v čase i amplitudě, lze jej nazývat digitální. V digitální technice je hojně využíván, protože umožňuje snadnou implementaci zařízení a nedochází u něj v takové míře ke zkreslení informace jako u signálu analogového. Tato práce se dále zabývá pouze digitálním signálem.

Sběrnici lze definovat jako skupinu jednoho a více vodičů, které zajišťují komunikaci mezi minimálně dvěma zařízeními. Tyto vodiče lze dále dělit dle jejich funkce na řídicí, adresní a datové (popřípadě napájecí). Každá sběrnice se řídí určitými předem danými pravidly – protokolem. Ten popisuje veškeré parametry od fyzického propojení (například typ použitého konektoru) po podobu uspořádání dat v datovém rámci.

V současné době existuje velké množství sběrnic, které se od sebe značně liší. Obecně nelze určit, jestli je některá z nich „lepší“ či „horší“, vždy záleží na požadavcích konkrétní aplikace (vzdálenost přenosu dat, úroveň okolního rušení a jiné) [4]. Sběrnice lze obecně rozdělit podle několika kritérií do různých kategorií, například:

- analogové/digitální,
- jednosměrné/obousměrné,
- paralelní/sériové,
- synchronní/asynchronní,
- napěťové/proudové.

1.1.1 Simplexní a duplexní sběrnice

Pokud jsou data přenášena pouze jedním směrem od vysílače k přijímači, lze tento přenos nazvat simplexní (simplex). Takto se šíří například televizní signál, televize data pouze přijímá,

ovšem zpětně nic neposílá. Je-li přenos obousměrný, ale v jeden okamžik může vysílat vždy jen jedno zařízení, jedná se o poloviční duplex (half duplex). Analogií by mohl být rozhovor dvou lidí, kdy může mluvit vždy jen jedna osoba a ta druhá poslouchá. Pokud by se začali navzájem překlíkovat, pravděpodobně by se nedomluvili. V poslední řadě může být komunikace plně duplexní (full duplex), kdy obě zařízení mohou v jeden okamžik vysílat i přijímat [3] [5].

1.1.2 Paralelní a sériový přenos dat

Digitální informace je složena z jednotlivých bitů. Je-li brán v úvahu signál, který může nabývat pouze dvou hodnot – logická nula a logická jednička, data lze po sběrnici přenášet paralelně (tedy posílat současně více bitů najednou) a sériově (jednotlivé bity za sebou v rámcích). Počet současně přenášených bitů udává šířka přenosového kanálu [4]. Je-li využito například kvadrurní amplitudové modulace (signál může nabývat více než dvou hodnot), může být i sběrnici s jediným datovým vodičem přenášeno současně více bitů a její šířka se tedy nemusí nutně rovnat jedné.

Na první pohled by se mohlo zdát, že použití paralelní sběrnice je výhodnější, hardware je jednoduchý (v ideálním případě pouze latch – záchytný registr), ovšem tohle platí jen pro nízké frekvence. S rostoucím kmitočtem se začnou projevovat nežádoucí jevy jako například přeslechy, vzájemné rušení, zkreslení signálu a odlišné doby distribuce signálu (skew) [3] [6].

Sériová komunikace s sebou sice přináší nutnost konstruovat složitější vysílací a přijímací zařízení, ovšem netrpí těmito neduhy a dovoluje dosáhnout vyšší přenosové rychlosti i přes fakt, že v konkrétní časový okamžik přenáší méně bitů. Použitím více sériových linek současně (sběrnice PCI Express) lze výslednou přenosovou rychlost zvýšit ještě více. Důležité je uvážit i fakt, že sériová komunikace potřebuje pro svou realizaci značně menší počet vodičů a tím šetří místo a usnadňuje návrh desek plošných spojů.

1.1.3 Přenosová rychlost

Přenosová rychlost (bit rate) udává objem informace (počet bitů nebo bajtů), jaký se přenesení za jednotku času [4]. Základní jednotkou je bit za sekundu ($b \cdot s^{-1}$, $\text{bit} \cdot s^{-1}$, bps – bit per second), dále je možné použít jednotku bajt za sekundu ($B \cdot s^{-1}$, $\text{Byte} \cdot s^{-1}$, Bps – byte per second). Tyto jednotky lze dále rozšířit předponami SI soustavy (ne binárními). Přitom platí, že $1 B \cdot s^{-1}$ je $8 b \cdot s^{-1}$.

Modulační rychlost (baud rate) udává počet změn stavu sběrnice za jednotku času, tedy rychlost změny signálu. S přenosovou rychlostí ji lze vzájemně přepočítávat, záleží na typu použité modulace a počtu datových vodičů. Je přesně rovna přenosové rychlosti pouze tehdy, je-li přenášena informace jen jedním datovým vodičem a využívá se pouze dvou logických úrovní. Jednotkou je 1 Bd – Baud, jméno nese po francouzském vynálezci Émile Baudotovi.

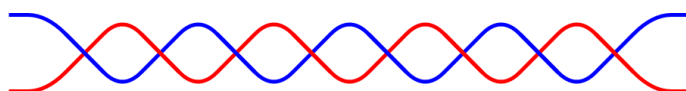
1.1.4 Metody detekce chybného přenosu dat

Při přenosu dat může například vlivem okolního rušení kdykoliv dojít k chybě (chybně přenesené bity). Proto se jednotlivé rámce opatřují redundantní (vzhledem k přenášené informaci nadbytečnou) informací, která umožňuje alespoň částečnou detekci chybného přenosu. Tato informace může nabývat délky jeden bit až několik bajtů. Jednou z mnoha metod je připojení jednoho paritního bitu. Ten nabývá jedničky nebo nuly podle toho, o jakou paritu se jedná. V případě liché parity doplní odesílatel zprávu tímto bitem právě tak, aby byl počet jedniček lichý, v případě sudé parity naopak tak, aby byl počet jedniček sudý. Příjemce poté zkontroluje, jestli je tento kontrolní bit validní. Výhodou je jeho jednoduchost a malá délka. Nevýhodou je to, že tato metoda dokáže odhalit pouze, pokud dojde k lichému počtu chyb [7].

Další možností je využití kontrolních součtů (checksum). Přenášená data jsou chápána jako čísla, která se vhodně sečtou. Tento součet (nebo jeho část) je následně připojen k samotné zprávě. Kontrolní součet je sice spolehlivější než paritní bit, ovšem pořád neumožňuje dostatečně spolehlivou detekci chyb.

Poměrně robustním řešením je použití cyklického redundantního součtu – CRC (cyclic redundancy check). Zjednodušeně lze říct, že je na odesílaná data opět pohlíženo jako na číslo, které se vydělí jiným vhodně zvoleným číslem. Zbytek po tomto dělení (modulo) je následně připojen k odesílané zprávě. Klíčové je zvolit dělitele, za tím se skrývá poměrně složitá matematika [8].

Pravděpodobnost chybného přenosu je možné dále snížit volbou vhodného přenosového média (dle pravidel elektromagnetické kompatibility – EMC) – stíněného vodiče, nestíněné i stíněné kroucené dvoulinky (twisted pair) a koaxiálního kabelu [9]. Kroucená dvojlinka je zobrazena na obrázku 1.

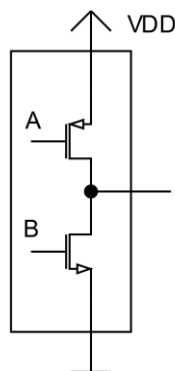


Obrázek 1: Kroucená dvojlinka (twisted pair)

Protokol může umožňovat handshaking – zařízení si mezi sebou navzájem potvrzují správnost jednotlivých kroků při přenosu [3].

1.1.5 Zapojení výstupních pinů digitálních obvodů

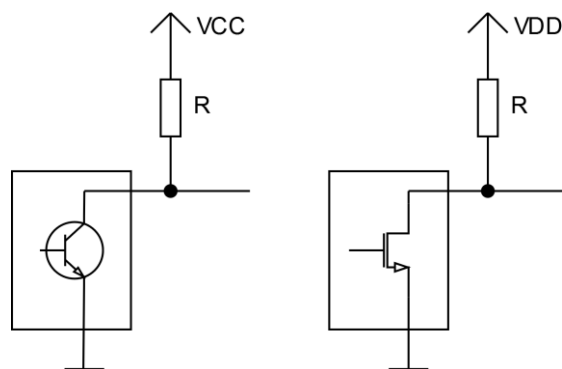
Zjednodušený model zapojení výstupního pinu mikrokontroléru (MCU), který slouží jako budič sběrnice, je zobrazen na obrázku 2. Jedná se o komplementární zapojení tranzistorů (push-pull). Pokud je tranzistor A sepnutý a tranzistor B rozepnutý, je na výstup připojeno napájecí napětí. V opačné konfiguraci tranzistorů je na výstupu přítomný zemní potenciál 0 V. Rozepnutím obou tranzistorů se výstup ocitne ve stavu vysoké impedance. Pokud by byly sepnuty oba tranzistory současně, došlo by ke svodu s enormní proudovou spotřebou.



Obrázek 2: Zapojení push-pull

Obdobně, pokud by bylo více zařízení s tímto výstupem připojeno na společný vodič sběrnice a došlo by ke kolizi (alespoň jedno zařízení by vodič sběrnice připojilo na napájecí napětí a současně alespoň jedno zařízení by tento vodič připojilo na zemní potenciál), opět by došlo ke svodu. Sběrnice užívající tyto výstupní piny musí být provozovány tak, aby k tomuto stavu nikdy nedošlo.

Možným řešením je použít výstupní pin v zapojení jako otevřený kolektor (open collector) či otevřený drain (open drain), kdy je tranzistor A vždy uzavřen. Toto zapojení je zobrazeno na obrázku 3. Na sběrnici je zapojený pull-up rezistor. Je-li tranzistor rozpojený (stav vysoké impedance), na sběrnici je přes rezistor přivedeno napájecí napětí (weak HIGH – slabá logická jednička). Při sepnutí tranzistoru je tato jednička „přebita“ a na sběrnici je přítomný nulový potenciál země. Pokud tedy vysílá alespoň jedno zařízení na sběrnici logickou nulu, celá sběrnice je ve stavu logické nuly. Tohle sice není přímým řešením kolizí, avšak odstraňuje nebezpečí výskytu svodu.



Obrázek 3: Otevřený kolektor (vlevo), otevřený drain (vpravo)

Vzhledem k tomu, že vodiče sběrnice představují nenulovou kapacitu, snižuje toto zapojení maximální přenosovou rychlost – kapacita sběrnice se nabíjí přes pull-up rezistor. Jeho hodnota odporu tedy musí být zvolena tak, aby se přes něj stíhala kapacita sběrnice dostatečně rychle nabíjet, zároveň však musí být tak velká, aby zbytečně nezatěžoval napájecí zdroj, popřípadě aby nedošlo k překročení proudového limitu pinu.

1.1.6 Řízení přístupu na sběrnici

Kolizím lze zamezit použitím vhodného protokolu. Ten definuje i to, kdy má jaké zařízení povolen přístup na sběrnici. Samotnou komunikaci aktivně řídí vždy jen jedno zařízení (master – pán), ostatní jsou pasivní (slave – otrok) [10]. Řízení může být:

- **centralizované:** master je vždy jen jedno zařízení zvané arbitr,
- **decentralizované:** master může být kterékoliv zařízení.

Samotné centralizované řízení může být:

- **prioritní:** každý slave má přiřazenou prioritu,
- **spravedlivé:** zařízení po sběrnici komunikují například v takovém pořadí, v jakém si zažádají o přístup.

Decentralizovaném řízení může být:

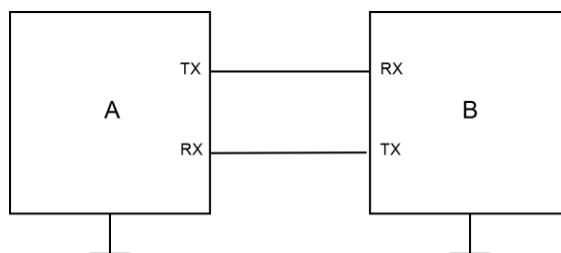
- **prioritní:** pokud chtějí sběrnici řídit dvě zařízení zároveň, přednost má to s vyšší prioritou,
- **spravedlivé,** zařízení si cyklicky předávají oprávnění ke komunikaci.

1.2 Použité sběrnice

Následující část této textové práce popisuje jednotlivé sběrnice, které byly při návrhu a realizaci zařízení použity. Jmenovitě UART, RS-485, I2C, SPI, 1-Wire, CAN, proudová smyčka a IČ přenos.

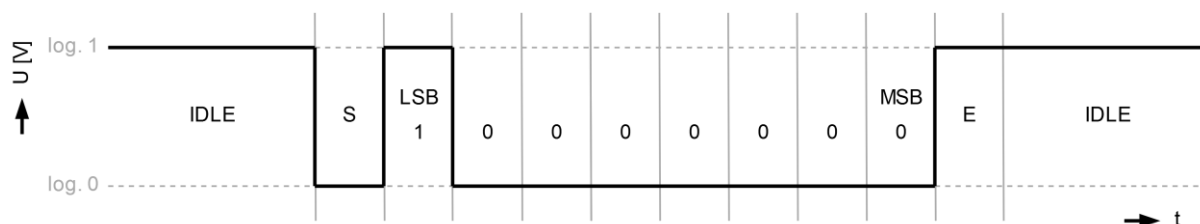
1.2.1 Sběrnice UART

UART (Universal asynchronous receiver/transmitter – univerzální asynchronní přijímač/vysílač) je sériová asynchronní (správně arytmičká) sběrnice [11]. Protokol je v základu point-to-point, využívá se tedy k přenosu dat mezi dvěma zařízeními (viz obrázek 4). Při použití obou vodičů zároveň se jedná o plně duplexní komunikaci [12]. Vodiče se zapojí do kříže, TX (transceiver – vysílač) pin zařízení A na RX (receiver – přijímač) pin zařízení B a naopak.



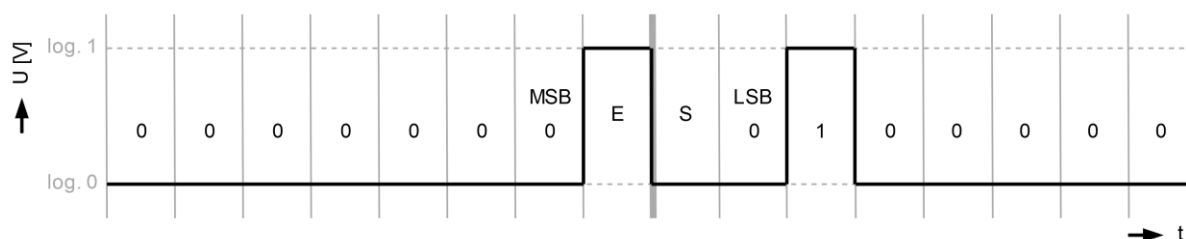
Obrázek 4: Sběrnice UART

Aby přenos dat proběhl v pořádku, obě strany musí předem znát a striktně dodržovat dané parametry komunikace (přenosová rychlost, počet datových bitů, typ parity a délka stop bitu). Příklad průběhu komunikace je zobrazen na obrázku 5. Jednotlivá data jsou posílána v rámcích. V klidovém stavu (IDLE) je na sběrnici přítomen stav logické jedničky. Komunikace je zahájena start bitem (S, logická nula). Na této sestupné hraně dochází k synchronizaci časových domén obou zařízení. Následuje několik datových bitů v pořadí od LSB (least significant bit – nejméně významný bit) po MSB (most significant bit – nejvíce významný bit). Počet těchto bitů je libovolný, často 8 (1 bajt). Dále může následovat paritní bit.



Obrázek 5: Průběh komunikace na sběrnici UART – 1

Jako poslední přichází stop bit (E, logická jednička). Ten může mít délku jednoho až dvou bitů. Jeho význam je zobrazen na obrázku 6. Pokud by došlo k vyslání dalšího rámce bezprostředně po tom, co byl odeslán předchozí, stop bit zaručuje to, že sběrnice bude nějakou chvíli uvedena ve stavu logické jedničky a na začátku nového rámce tedy bude vždy přítomna sestupná hrana pro synchronizaci hodinových domén [13].



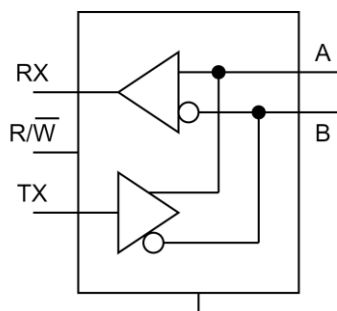
Obrázek 6: Průběh komunikace na sběrnici UART – 2

Důležité je poznamenat to, že stavu logické nuly odpovídá napětí 0 V a stavu logické jedničky odpovídá napájecí napětí. Používané modulační rychlosti se pohybují v řadech jednotek až stovek tisíců Baudů.

1.2.2 Sběrnice RS-485

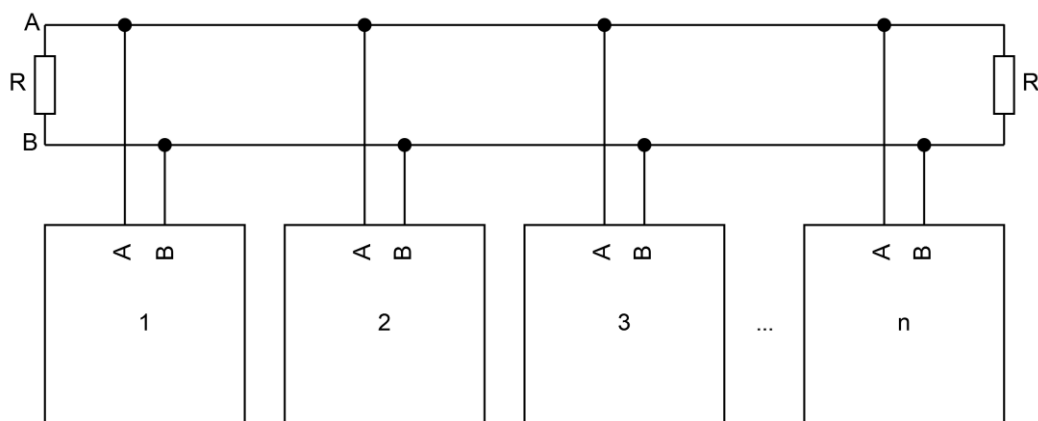
RS-485 (Recommended standard 485, případně EIA-485 či TIA/EIA-485) je sériová polo duplexní asynchronní sběrnice [14]. Jedná se pouze o fyzickou vrstvu. Signál je přenášen dvěma vodiči (malé náklady na vybudování přenosové cesty), nejlépe stíněnou kroucenou dvojlinkou [15]. Označují se A a B a jsou buzeny s opačnou fází. Pracuje se s rozdílem potenciálu přímo mezi nimi, používá se tedy diferenční vstup. Takové provedení značně

omezuje rušení, proto je tato sběrnice vhodná i do zarušeného průmyslového prostředí. Zjednodušený model budiče (převodníku UART na RS-485) je zobrazen na obrázku 7. Jeho součástí je i řídicí pin, který připojuje a odpojuje budící část od sběrnice.



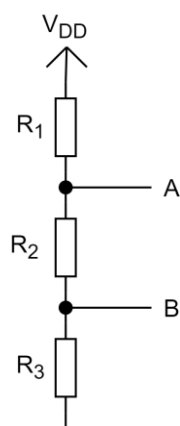
Obrázek 7: Budič sběrnice RS-485

Bez opakovací (repeater) je možné komunikovat při nízké přenosové rychlosti do vzdálenosti až 1 200 m [16]. Na krátkou vzdálenost lze komunikovat s modulační rychlostí až 10 MBd. Do jednoho segmentu sítě lze připojit až 32 zařízení. Aby nedocházelo k odrazům na vedení, je vhodné jeho začátek a konec impedance přizpůsobit 120Ω (60Ω) rezistory, viz obrázek 8. Tato hodnota odporu odpovídá charakteristické impedanci použitého vedení.



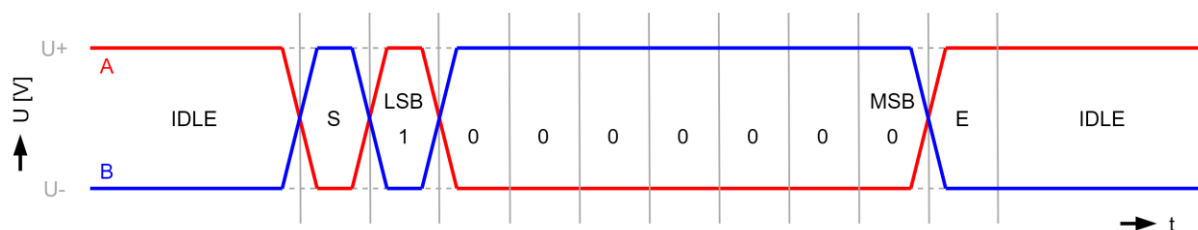
Obrázek 8: Sběrnice RS-485

Pro případ, kdy nekomunikuje žádné zařízení a na sběrnici není připojen žádný budič, je třeba zajistit správné napěťové úrovně na vodičích. K tomu slouží aktivní zakončovací impedance, jedná se vhodně zvolené bias rezistory (viz obrázek 9). Rozdíl potenciálů mezi vodiči bývá typicky 2 V.



Obrázek 9: Aktivní zakončovací impedance sběrnice RS-485

Na obrázku 10 je zobrazen průběh komunikace na sběrnici RS-485. Je využito řadiče (převodníku) UART na RS485 a jsou odesílána stejná data jako na obrázku 5.



Obrázek 10: Průběh komunikace na sběrnici RS-485

Napěťové úrovně se pro vysílač i přijímač liší (viz tabulka 1). Diferenční napětí U_D se určí rovnicí:

$$U_D = U_A - U_B, \quad (1)$$

kde U_A představuje napětí na vodiči A a U_B představuje napětí na vodiči B (vše ve voltech). Zároveň by U_D nemělo být v absolutní hodnotě větší jak 6 V.

Tabulka 1: Napěťové úrovně sběrnice RS-485

strana	U_D [V]	
	log. 0	log. 1
vysílač	< - 1,5	> 1,5
přijímač	< - 0,2	> 0,2

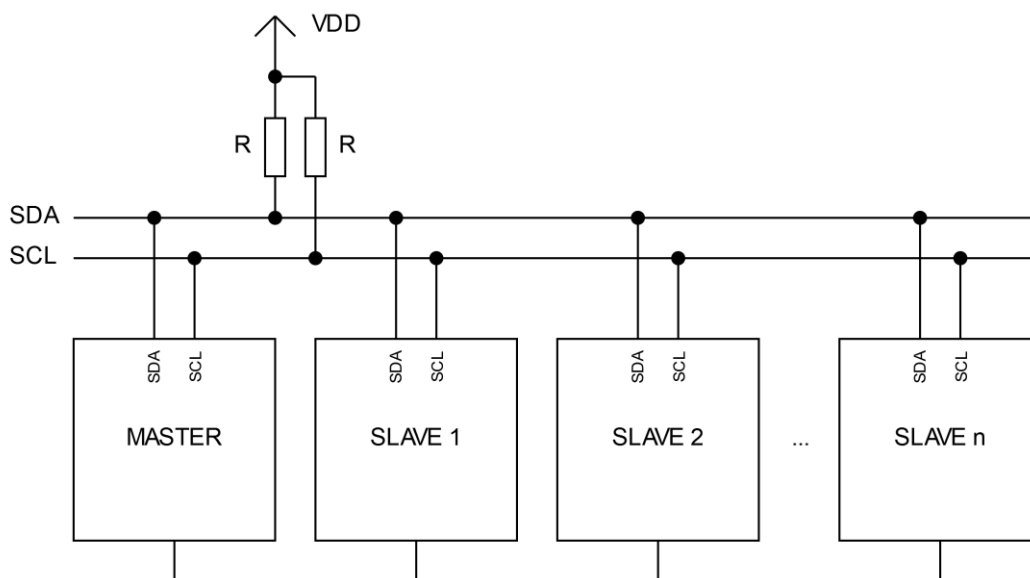
Značení jednotlivých vodičů sběrnice se může u různých výrobců lišit.

1.2.3 Sběrnice I2C

Sériová sběrnice I2C (I^2C , IIC – Inter-integrated-circuit) byla navržena společností Philips [16]. Pod zkratkou TWI (Two wire interface) se skrývá až na pár výjimek téměř totožná sběrnice, kterou přestavila společnost Atmel a jiné společnosti, aby se vyhnuly potížím s obchodními značkami [17]. Jak již název napovídá, komunikace probíhá prostřednictvím dvou signálových a společného zemního vodiče. Označují se SDA (seriál data – datový vodič) a SCL (serial clock – vodič přenášející synchronizační pulzy). Slouží především ke komunikaci mezi integrovanými obvody uvnitř zařízení [18].

Zapojení je zobrazeno na obrázku 11. Výstupy jednotlivých zařízení jsou v konfiguraci otevřeného kolektoru/otevřeného drainu. Umožňuje i připojení více masterů (multimaster), často je ale přítomen pouze jeden. Časovou synchronizaci řídí vždy master, datový vodič je obousměrný, polo duplexní. Hodnota odporu rezistorů bývá v řádu jednotek kiloohmů, závisí na frekvenci – čím vyšší je frekvence, tím menší tato hodnota musí být (nabíjení parazitní kapacity sběrnice). Pro frekvenci 100 kHz (základní verze) postačují rezistory 4,7 k Ω . Ve vylepšených verzích se může být kmitočet 400 kHz nebo 1 MHz.

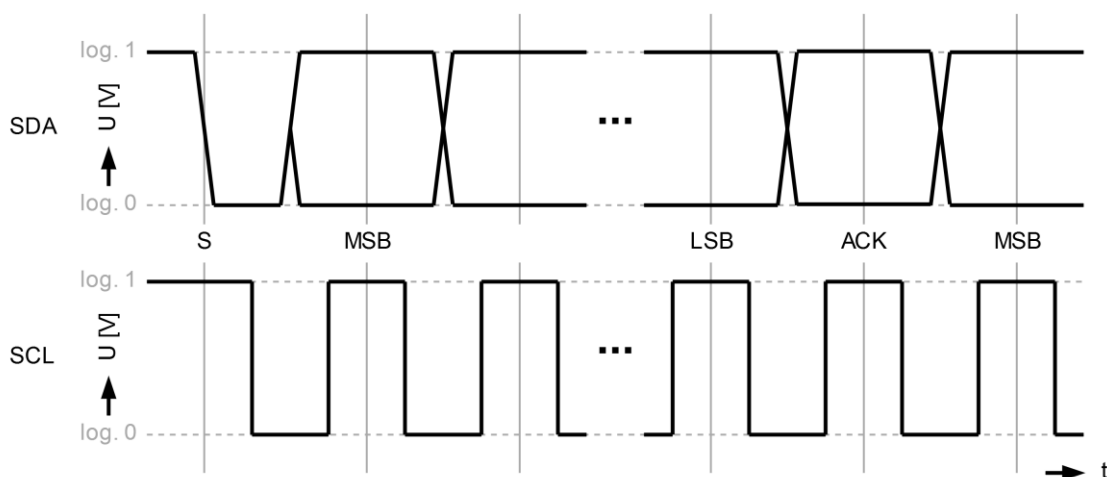
Průběh komunikace je zobrazen na obrázcích 12 a 13. V klidovém stavu je na obou vodičích přítomna logická jednička. Přenos je vždy zahájen start bitem (S), kdy přechází SDA vodič do stavu logické nuly, zatímco SCL vodič zůstává ve stavu logické jedničky. Následně i ten přejde do stavu LOW. V tomto případě může dojít k nastavení hodnoty následujícího bitu na SDA. Následně SCL přechází zpět do HIGH, v tuto chvíli musí být data platná a nesmí se měnit. Vzorkování probíhá na následující sestupné hraně SCL. Data se řadí od MSB po LSB. Nejčastěji je odesíláno 8 bitů, tedy jeden bajt.



Obrázek 11: Sběrnice I2C

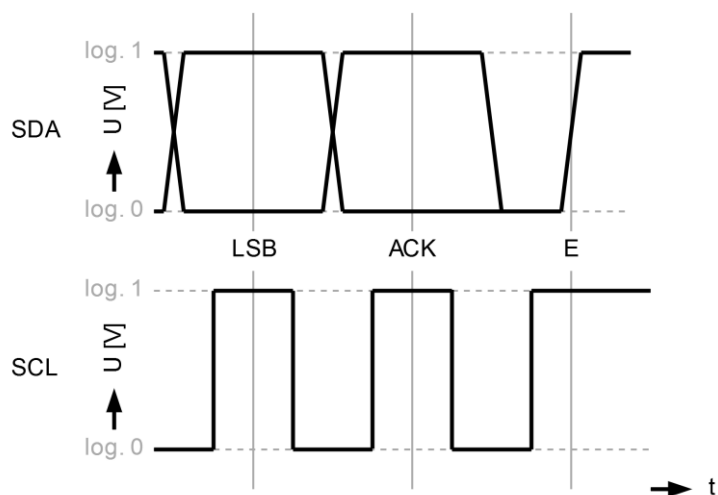
Bezprostředně po příslušné skupině dat následuje bit ACK (acknowledge). Master, je-li vysílač, vysílá HIGH a slave potvrzuje přijetí vysláním logické nuly (v tomto případě

je tedy na SDA úroveň LOW, protože sběrnice představuje funkci logického součinu) [3]. Tímto slave potvrzuje i to, že je případně připraven přijmout další data, která jsou posílána ihned po ACK bitu. Případně nereaguje (je zaneprázdněn, nebo rovnou není zapojen – odesílá HIGH), v tom případě musí master ukončit komunikaci a sběrnici uvolnit. Je-li master přijímač, opět musí po přijetí každého bitu nastavit ACK do LOW. Pouze pokud je již přenos dokončen, nastaví HIGH.



Obrázek 12: Průběh komunikace na sběrnici I2C – 1

Samotný stop bit (E) je generován obdobně jako start bit. SDA přechází z LOW do HIGH, zatímco SCL musí být v úrovni logické jedničky. Bitová synchronizace probíhá se sestupnou hranou hodinového signálu. Pokud tedy některé zařízení nestíhá komunikovat dostatečně rychle, přidrží ho na úrovni logické nuly. Tímto se celá komunikace přizpůsobuje nejpomalejšímu členu.



Obrázek 13: Průběh komunikace na sběrnici I2C – 2

Detekce kolizí probíhá tak, že zařízení, které vysílá, současně sleduje skutečný stav sběrnice. Pokud je zjištěna odlišnost, odesílá data současně i jiné zařízení, které má „vyšší

prioritu“. Zařízení s „nižší prioritou“ okamžitě přestane odesílat svá data, přitom nedojde ke zkrácení právě probíhající komunikace.

Adresování probíhá pomocí 7bitové (10bitové v rozšířené verzi) adresy doplněné o R/W bit (HIGH pro čtení). Teoreticky je tedy možné připojit až 128 (1024) zařízení. Ve skutečnosti však mají některé obvody svou adresu pevně danou. Aby bylo možno zapojit na jednu sběrnici více stejných zařízení, mají některé obvody pevně danou jen její část (určuje typ zařízení), zbylá je programovatelná (obvykle 3 bity). Navíc jsou některé adresy, například 0 dekadicky, vyhrazeny pro jiné účely. Napětíové úrovně signálu jsou například 5 V, 3,3 V a podobně.

1.2.4 Sběrnice SPI

Sériová synchronní periferní sběrnice SPI (Serial peripheral interface) byla navržena společností Motorola [16]. Označuje se také jako Microwire [3]. Je zobrazena na obrázku 14. Současně lze ke sběrnici připojit pouze jedno master zařízení. Nejjednodušším provedení hardwaru pro zpracování dat je posuvný registr. Využívá se i pro programování mikroprocesorů a obvodů FPGA (field programmable gate array – programovatelné hradlové pole). Odesílá se vždy jeden bajt dat. Komunikace probíhá přes vodiče:

- **MOSI** – master on, slave in, přenos dat od mastera ke slave zařízení,
- **MISO** – master in, slave on, přenos dat od slave zařízení k masterovi,
- **SCLK** – synchronizace,
- **SS/CS** – slave select/chip select, výběr sluhy, se kterým bude probíhat komunikace (tento vodič zpravidla využívá negativní logiky).

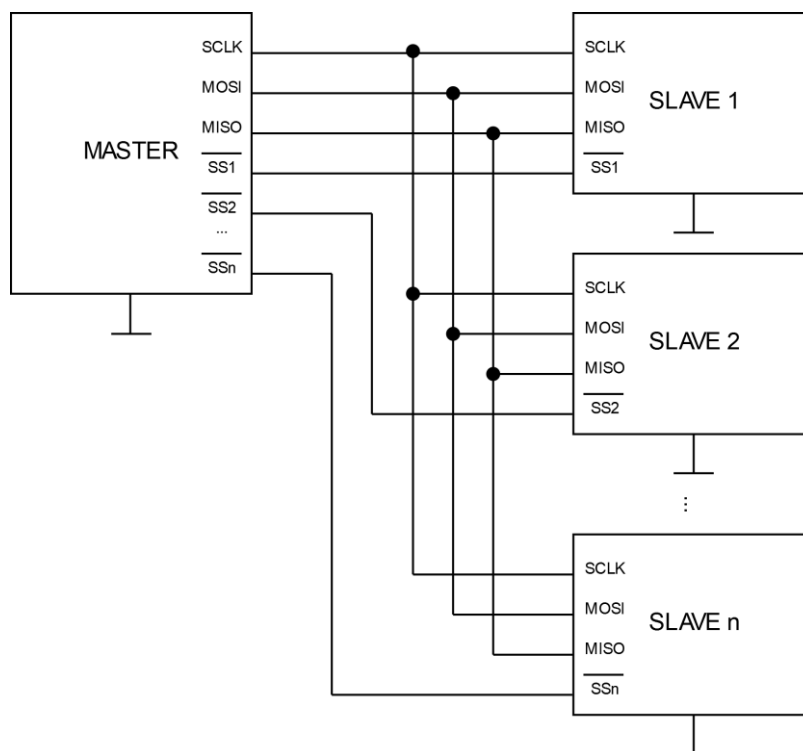
Kolizím je tedy zabráněno tak, že master komunikuje vždy jen s jedním slave zařízením, které vybere pomocí příslušného vodiče. Ostatní sluhové mají výstup MISO ve stavu vysoké impedance. Je možné provozovat sběrnici i bez SS/CS vodičů, ovšem v tomto případě je nutné doplnit protokol o možnost adresování. Touto konfigurací se tato práce nezabývá.

Dále může sběrnice přizpůsobovat svůj chod připojeným periferiím. Nejen tím, že dokáže měnit frekvenci synchronizačního signálu, ale i další parametry pomocí bitů CPOL a CPHA (výběr módu). Hodnota bitu CPOL odpovídá logické úrovni synchronizačního vodiče v klidovém stavu. Bit CPHA nastavuje, na jaké náběžné hraně bude docházet ke vzorkování dat (viz tabulka 2). Pokud je CPHA nastaveno na LOW, vzorkuje se „první“ hranou, v opačném případě se vzorkuje „druhou“ hranou.

Tabulka 2: Konfigurační bity sběrnice SPI

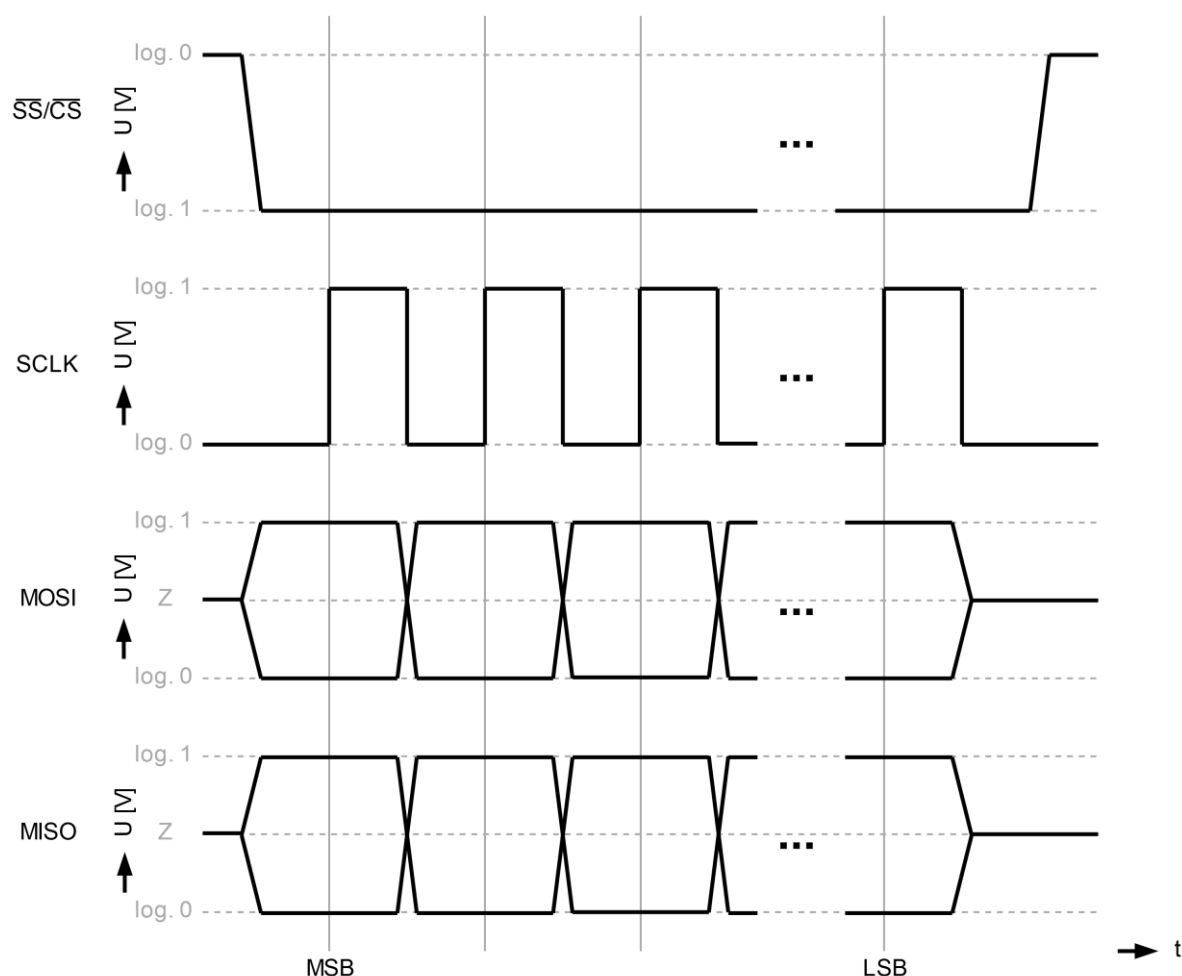
CPOL	CPHA	hrana	režim
0	0	náběžná	0
0	1	sestupná	1
1	0	sestupná	2
1	1	náběžná	3

Oproti sběrnici I2C je mnohem rychlejší, hodinový signál může dosahovat rychlosti až 5 MHz.



Obrázek 14: Sběrnice SPI

Průběh komunikace na sběrnici SPI v režimu 0 je zobrazen na obrázku 15. V klidovém stavu je SS/CS ve stavu logické jedničky (negativní logika), SCLK je LOW (CPOL = 0), MOSI a MISO jsou ve stavu vysoké impedance (Z). Komunikace je zahájena sestupnou hranou na SS/CS, přitom jsou nastavena data na vodičích MISO a MOSI. Dále jsou tyto data nastavena vždy při „druhé“ – tedy sestupné hraně SCLK. Vzorkování dat tedy probíhá při „první“ – tedy náběžné hraně SCLK (CPHA = 0). Při poslední sestupné hraně SCLK jsou vodiče MOSI a MISO uvedeny do stavu vysoké impedance, SCLK tedy zůstává nulový. Komunikace je ukončena náběžnou hranou na vodiči SS/CS. Sběrnice tímto přechází zpět do klidového režimu.

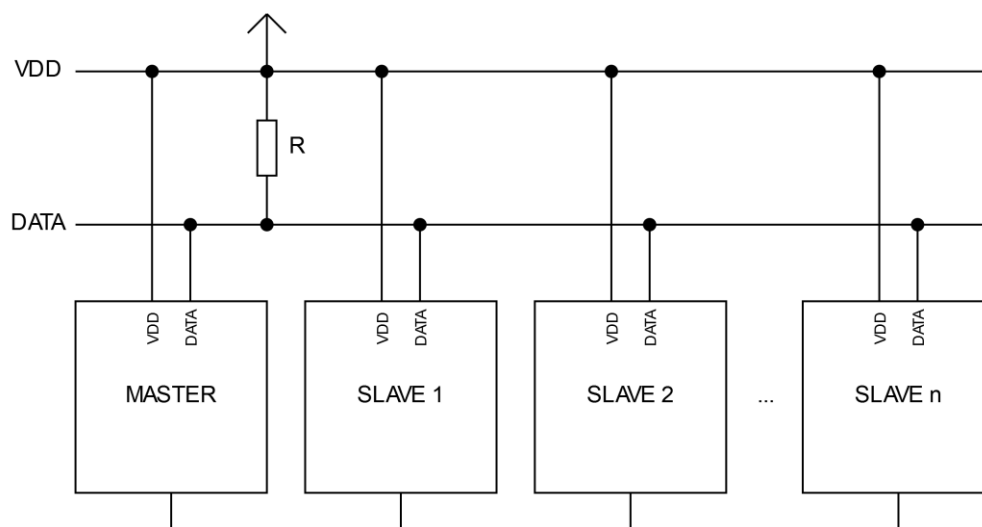


Obrázek 15: Průběh komunikace na sběrnici SPI

Data jsou odesílána v pořadí od MSB po LSB. Úroveň logické nuly odpovídá napětí 0 V, úroveň logické jedničky napájecí napětí mikroprocesoru.

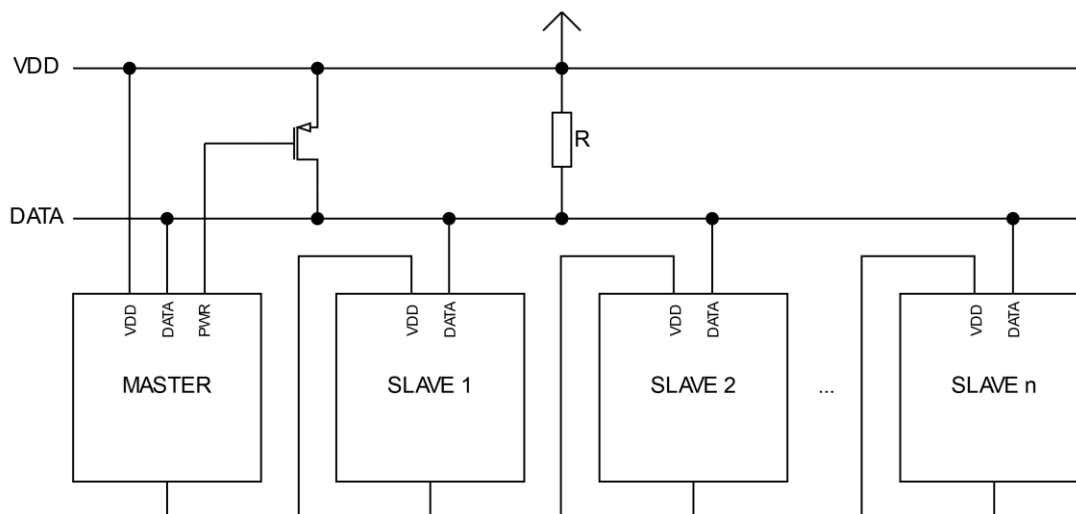
1.2.5 Sběrnice 1-Wire

Sériovou asynchronní sběrnici 1-Wire (MicroLAN, Dallas) navrhla společnost Dallas Semiconductor [4] [16]. Jak již název napovídá, k přenosu dat slouží pouze jeden polo duplexní vodič. Používá se například v elektronických klíčenkách, které mají vyvedeny jen dva vývody (jeden pro data a druhý pro propojení zemních potenciálů). Zapojení je zobrazeno na obrázku 16. Datový pin je v konfiguraci otevřeného kolektoru/otevřeného drainu. Komunikaci řídí vždy jen jeden master, lze připojit několik slave zařízení. Ty lze ve speciálním parazitním režimu napájet přímo z datového vodiče (mají integrovaný kapacitor, který uchová dostatek energie) – například již zmíněné klíčenky (viz obrázek 17) [19].



Obrázek 16: Sběrnice 1-Wire

Při provozu sběrnice v parazitním režimu se v některých případech může stát, že zařízení potřebuje odebrat větší proud, než jaký dokáže protéct pull-up rezistorem [20]. Tento problém lze vyřešit tím, že master ve vhodný okamžik (jinak hrozí riziko svodu s enormní proudovou spotřebou) sepne tranzistor a přemostí tento rezistor, tedy připojí datový vodič přímo na napájecí napětí. Volba hodnoty odporu pull-up rezistoru závisí na délce (tedy kapacitě) vodiče, rychlosti komunikace a volbě napájecího režimu. Ideální hodnota je kolem 5 k Ω .



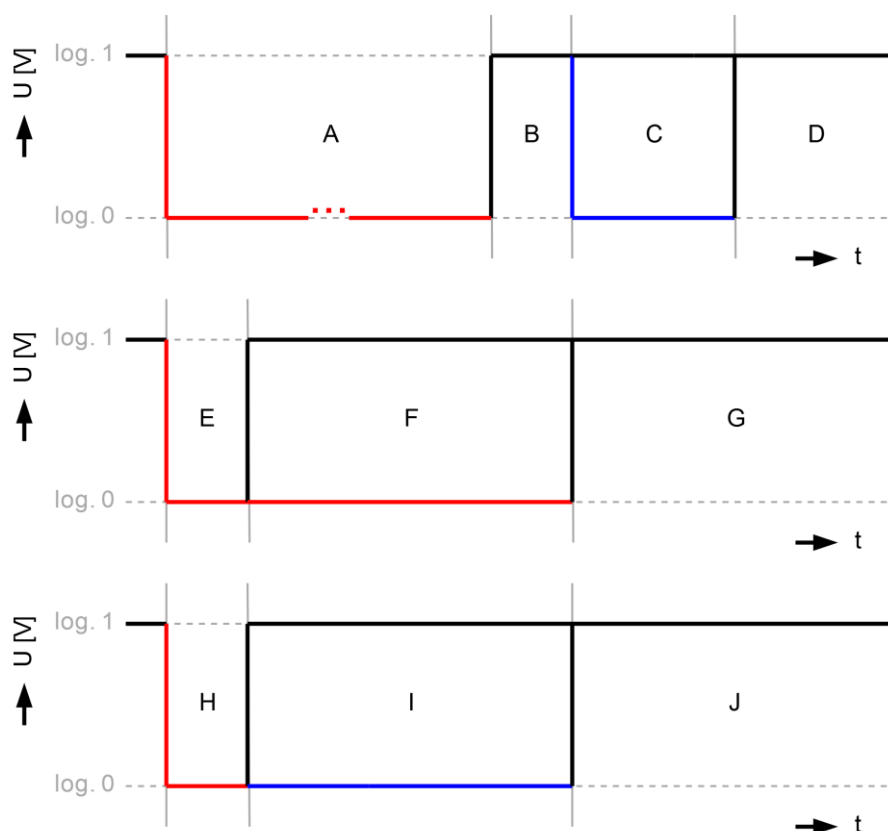
Obrázek 17: Sběrnice 1-Wire, parazitní režim

Komunikace se (z pohledu mastera) skládá ze tří operací: nulování, zápis a čtení. Všechny operace jsou zobrazeny na obrázku 18. Ten slouží pouze pro ilustraci, časová osa není v měřítku. Červenou barvou jsou vyznačeny oblasti, kdy došlo (případně mohlo dojít) k uzemnění sběrnice masterem, modře jsou vyznačena místa, kdy byla (mohla být) sběrnice uzemněna některým ze slave zařízení. Úroveň logické nuly odpovídá napětí 0 V, logická jednička odpovídá napájecímu napětí.

V klidovém stavu je na sběrnici úroveň logické jedničky. Každá operace je zahájena sestupnou hranou, kdy dochází k synchronizaci časových domén jednotlivých zařízení. Komunikace probíhá v časových úsecích zvaných sloty. Jeden slot trvá 60 (standardně) až 120 μs , při něm většinou proběhne operace s jedním bitem. Maximální modulační rychlost f v hertzech je tedy učena obrácenou hodnotou doby trvání jednoho slotu T v sekundách:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{60 \cdot 10^{-6}} \cong 16,667 \text{ [kHz]}. \quad (2)$$

Na obrázku 18 nahoře je zobrazen průběh při nulování sběrnice. Oblast A trvá minimálně 8 slotů, tedy 480 μs . Zde dochází k resetování všech připojených zařízení. Po uvolnění sběrnice přichází interval o délce od 15 do 60 μs (typicky 30 μs , oblast B), po kterém musí všechna zařízení, která jsou ke sběrnici připojena, vyslat logickou nulu po dobu 60 až 240 μs (typicky 120 μs , oblast C). Takto master detekuje, zda je přítomen alespoň jeden slave.



Obrázek 18: Průběh komunikace na sběrnici 1-Wire

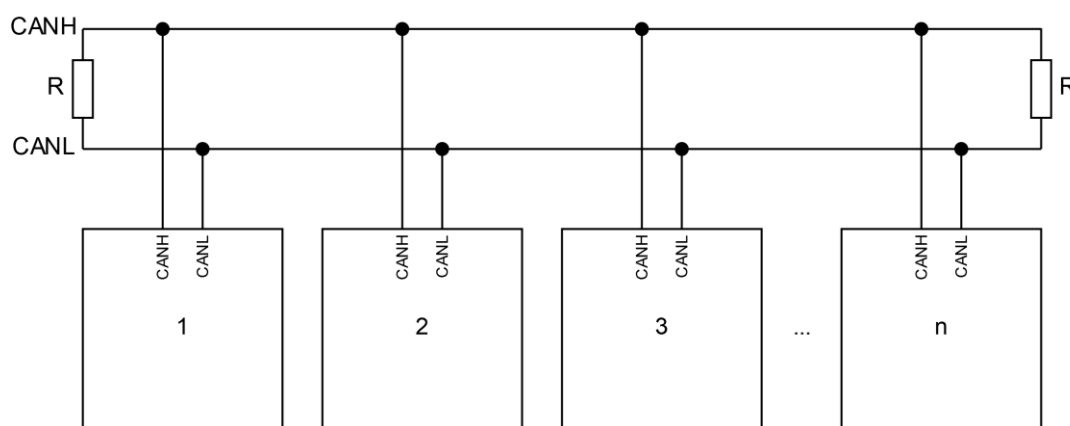
Dále pak resetovaná sběrnice přechází do klidového stavu (oblast D), kdy je například v případě použití parazitního režimu provedeno dobíjení vnitřních napájecích kapacitorů jednotlivých zařízení. Doba vypočtená součtem intervalů B, C a D musí být minimálně 480 μs , v opačném případě se prodlužuje oblast D.

Na obrázku 18 uprostřed je zobrazen průběh při zápisu jednoho bitu. Opět nejprve dojde k zahájení komunikace sestupnou hranou. Nulová logická úroveň je vysílána 1 až 15 μs (typicky 6 μs , oblast E). Následně je v době od 15 do 60 μs (oblast F) vysílána taková logická hodnota, jakou je potřeba zapsat. Zde slave provádí vzorkování (typicky při 30 μs). Následně sběrnice opět přechází do klidového stavu (oblast G). Oblasti E a F společně představují jeden slot.

Na obrázku 18 dole je zobrazen průběh při čtení jednoho bitu. Čtení probíhá obdobně jako zápis. V oblasti H se master chová stejně jako v oblasti E. Ovšem slave nastaví na vodič požadovanou logickou hodnotu tak rychle, jak je to jen možné. Tuto hodnotu na vodiči drží do konce slotu (oblast H a I). Master vzorkuje sběrnici v době asi 15 μs (oblast I). Interval J je obdobou intervalu G. Samotná komunikace pak probíhá tak, že se se tyto operace skládají do vhodné posloupnosti definované protokolem konkrétního zařízení.

1.2.6 Sběrnice CAN

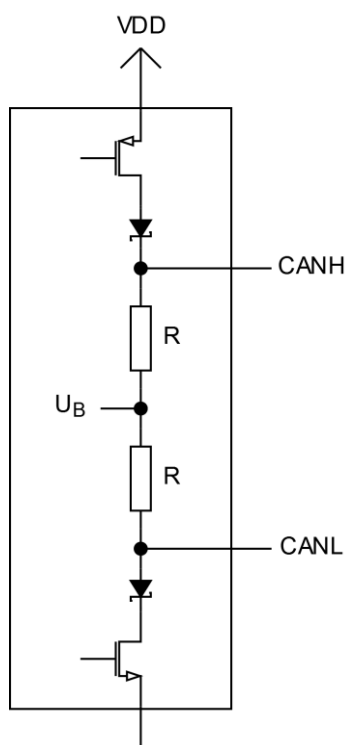
Sériová asynchronní polo duplexní sběrnice CAN (Controller area network) byla vyvinuta společností Robert Bosch GmbH [4]. Uplatnění našla především v automobilovém průmyslu [21]. Nabízí relativně velkou přenosovou rychlost – 1 Mb/s do vzdálenosti 40 m. S rostoucí délkou pochopitelně tato rychlost klesá. Obdobně jako sběrnice RS-485 je poměrně odolná vůči okolnímu rušení, protože využívá metody diferenčního přenosu dat a na vedení se používá opět (stíněná) kroucená dvojlinka. Zapojení je zobrazeno na obrázku 19. Jednotlivé vodiče se označují CANH a CANL. Aby nedocházelo k odrazům na vedení, jeho konce se zakončují rezistory s takovou hodnotou odporu, jaká je charakteristická impedance použitého vedení.



Obrázek 19: Sběrnice CAN

Zjednodušený model zapojení výstupní části budiče je zobrazen na obrázku 20. U této sběrnice se rozlišují dva stavy – recesivní (recessive, logická jednička) a dominantní (dominant, logická nula). Pokud jsou oba tranzistory v budiči rozepnuty, je na vodiče přes rezistory R přivedeno napětí U_B , nachází se tedy v recesivním stavu. Jsou-li ale oba tranzistory sepnuty, na vodiči CANH je přítomno téměř napájecí napětí (3,5 až 5,0 V),

zatímco na vodiči CANL je přítomný téměř nulový potenciál (0,0 až 1,5 V) – dominantní stav. Podobně jako u otevřeného kolektoru/otevřeného drainu, pokud je tedy alespoň jeden budič v dominantním stavu, je v něm i celá sběrnice (odtud je i odvozen jeho název).

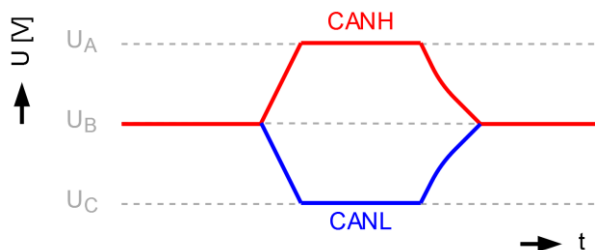


Obrázek 20: Budič sběrnice CAN

Průběh komunikace je zobrazen na obrázku 21. Při přechodu z dominantního do recesivního stavu dochází k vybíjení parazitní kapacity vodičů přes rezistory uvnitř budiče, což může mít vliv na výslednou přenosovou rychlost. Diferenční napětí U_D ve voltech se určí dle vzorce:

$$U_D = U_A - U_C, \quad (3)$$

kde U_A je napětí ve voltech na vodiči CANH a U_C je napětí ve voltech na vodiči CANL.



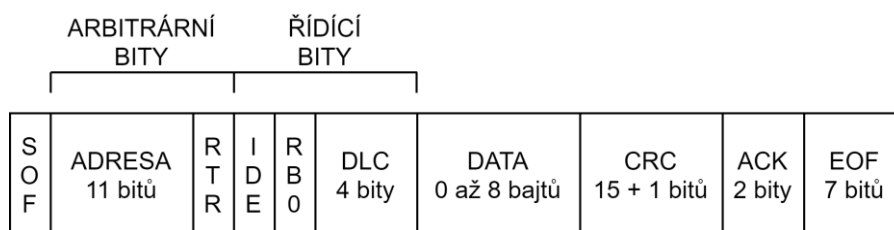
Obrázek 21: Průběh komunikace na sběrnici CAN

Sběrnice může pracovat v režimech master-slave a multimaster. Každé zařízení má určenou svou jedinečnou adresu. Pokud chce zahájit komunikaci, jako první vysílá právě ji. Detekce kolizí probíhá tak, že jakmile je u kteréhokoli vysílače zjištěna odlišnost mezi vysílanými daty a skutečným stavem sběrnice, přeruší vysílání a pokračuje jako přijímač. Dále vysílá zařízení s vyšší prioritou (danou dle adresy), aniž by došlo ke zkreslení odesílané informace.

Standard CAN definuje fyzickou i linkovou vrstvu. Každý přenášený rámeček je uveden start bitem (SOF – start of frame) [22]. Následuje několik arbitrárních a řídicích bitů (zde je uvedena například adresa zařízení, typ rámce a počet přenášených bajtů dat), samotná data (0 až 8 bajtů), 15bitový cyklický redundantní součet (CRC) včetně 1bitového oddělovače, potvrzení (ACK) a ukončení rámce (EOF – end of frame). Samotný rámeček může být:

- **data frame:** pro přenos dat od vysílače k přijímači/přijímačům,
- **remote frame:** pro vyžádání přenosu dat (vysílačem) od jiného zařízení (přijímače),
- **error frame:** je vysílán kterýmkoliv zařízením při detekci chyby při přenosu,
- **overload frame, interframe space:** pro vyžádání prodlevy (například na zpracování přijatých dat).

Standard CAN 2.0B umožňuje použití 11bitové (standard data frame) i 29bitové (extended data frame) adresy. Na obrázku 22 je zobrazena podoba datového rámce s 11bitovou adresou – standard data frame.



Obrázek 22: Datový rámeček s 11bitovou adresou

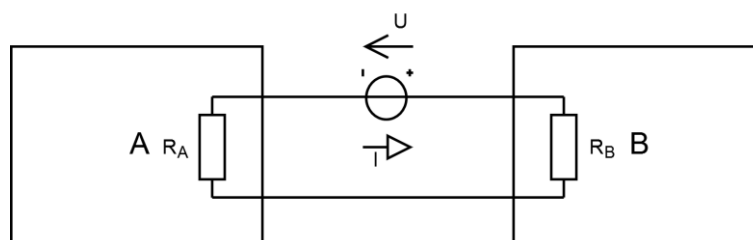
Bity RTR (remote transmission request), IDE (extended identifier) a RB0 (reserved bit 0) jsou v dominantním stavu (logická nula). Pole DLC (data length code) udává počet odesílaných bajtů dat.

1.2.7 Proudová smyčka

Proudová smyčka nachází využití zejména v průmyslové automatizační technice [23]. Existuje ve dvou (třech) variantách:

- **analogová** – hodnoty jsou vyjádřeny velikostí proudu,
- **digitální** – úrovní logické nuly odpovídá proud 4 mA (popřípadě 0 mA), logické jedničky proud 20 mA.

Příklad zapojení obvodu proudové smyčky je zobrazen na obrázku 23. Rezistor R_A zařízení A (vysílač) může představovat proměnný odpor (výstupní tranzistor), který slouží jako zdroj proudu v obvodu. Odpor R_B zařízení B (přijímač) má malou hodnotu odporu a slouží jako snímač proudu (převodník proudu na napětí). Do obvodu může být připojeno více přijímačů, všechny se řadí do série. Zdroj napětí musí být dimenzovaný tak, aby byl schopný kompenzovat úbytky napětí na vedení a všech snímacích odporech ve smyčce.



Obrázek 23: Proudová smyčka

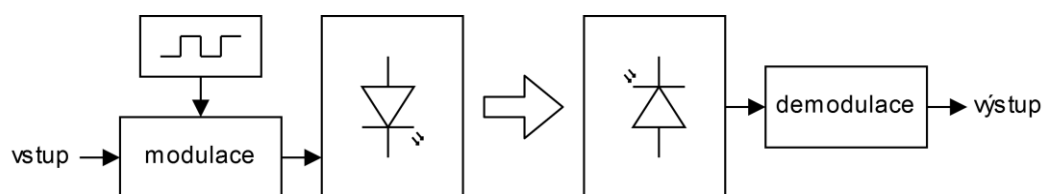
Obousměrná komunikace je možná použitím dvou samostatných proudových smyček. Hlavní předností této sběrnice je to, že je poměrně jednoduchá a odolná vůči šumu a okolnímu rušení – pro přenos informace je využit elektrický proud, který je řádově větší než superponovaný rušivý proud. Navíc nabízí možnost přímého napájení, dokáže komunikovat na vzdálenost stovek metrů (až 5 km) [16].

1.2.8 Infračervený přenos dat

K přenosu informace se používá infračerveného (IČ, IR – infrared) světla, které má nižší frekvenci – vyšší vlnovou délku než viditelné spektrum elektromagnetických vln. Toto záření není člověku škodlivé, neprochází přes stěny a neinterferuje s radiovými vlnami. Navíc není nutné propojovat zařízení, která spolu komunikují. Využití tento přenos dat našel zejména u spotřební elektroniky (dálkové ovládání, mobilní telefony). Vzdálenost, na jakou lze tímto způsobem komunikovat, se pohybuje v řádu desítek metrů [24]. Záleží na mnoha faktorech – například úhel natočení vysílače vůči přijímači.

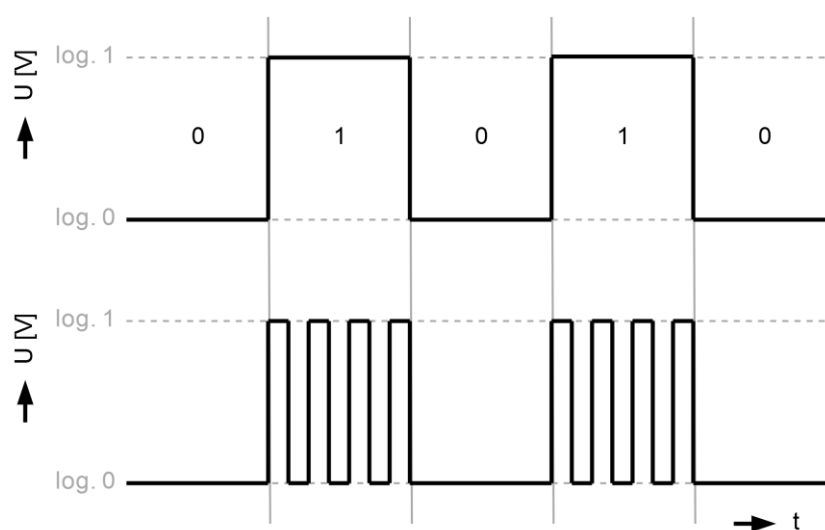
Aby bylo dosaženo co nejvyššího potlačení rušení (například okolní osvětlení), je nutné, aby byl vysílací výkon co nejvyšší. Při přenosu dat je tedy výhodné použít modulaci – LED dokáže v pulzním režimu vysílat špičkově větší výkon než v režimu kontinuálním [25].

Zjednodušené blokové schéma přenosu dat je zobrazen na obrázku 24. Přenosový řetězec začíná modulátorem, do kterého vstupují přenášená data a nosný signál. Úpravou signálu tedy docílíme zvýšení odolnosti proti rušení. Výstup modulátoru budí IČ LED. Světlo se šíří prostorem, dokud nedopadne na fotodiodu (popřípadě na fototranzistor), která ho dokáže detekovat a převést zpět na elektrický signál [26]. Po následné demodulaci je na výstupu přítomná přenášená informace.



Obrázek 24: IČ přenos

Na obrázku 25 nahoře jsou zobrazena přenášená data – obálka a dole je zobrazen modulovaný signál.

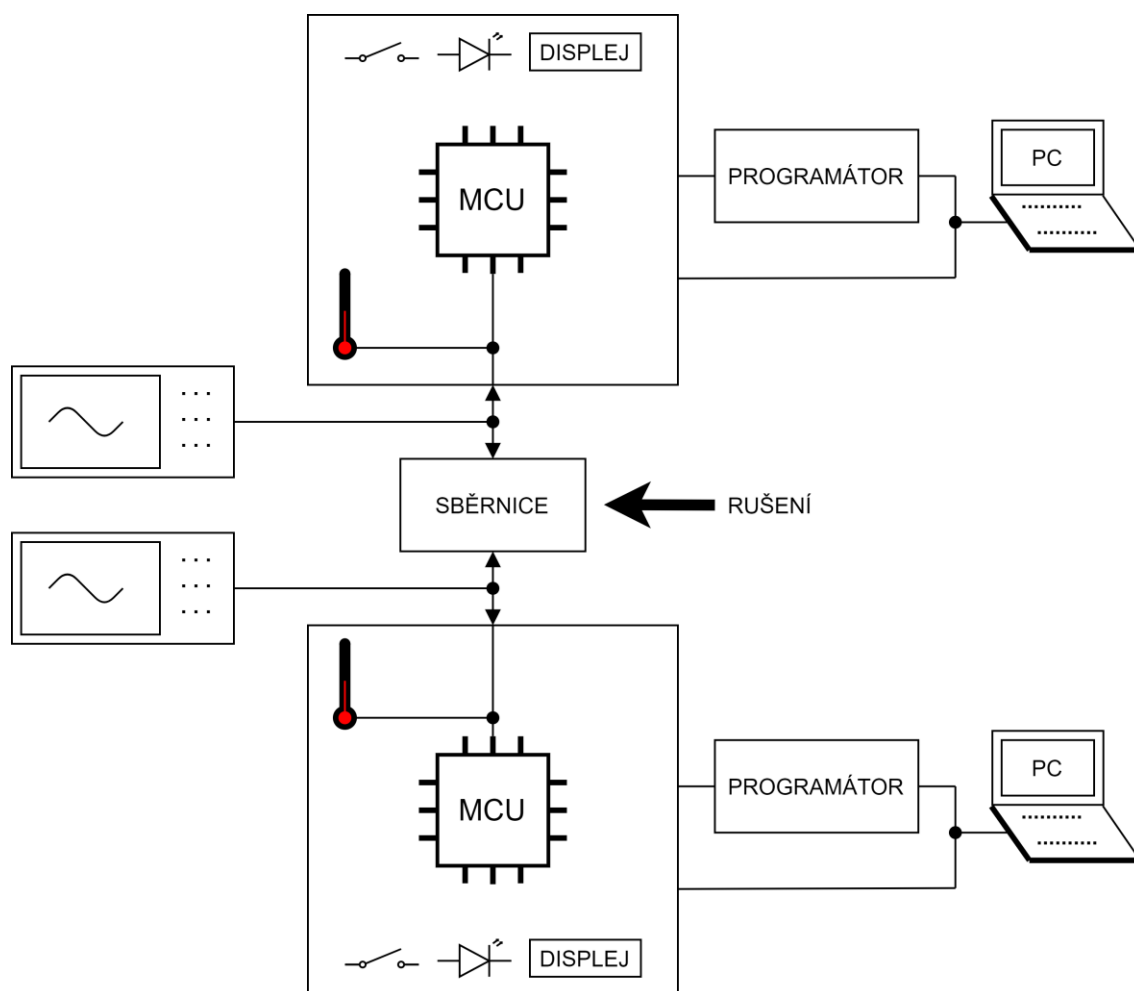


Obrázek 25: Průběh komunikace přes IČ přenos

Existuje více možností, jak komunikovat pomocí infračerveného světla. Příkladem může být protokol IrDA [3].

2 OBVODOVÝ NÁVRH LABORATORNÍHO PŘÍPRAVKU

Cílem této bakalářské práce je návrh a realizace laboratorního přípravku (dále i pouze přípravek, popřípadě navrhované zařízení), který bude vhodný pro výuku a demonstraci sběrnic. Koncept je zobrazen na obrázku 26. Jedná se o vývojový kit, jehož hlavní komponentou je mikrokontrolér. Ten bude komunikovat pomocí implementovaných sběrnic buď s periferiemi umístěnými přímo na totožné desce plošného spoje (například s teploměrem), nebo bude možné propojit více přípravků dohromady a komunikace bude probíhat přímo mezi nimi. Existuje i možnost připojení dalších externích zařízení, pokud budou splňovat potřebné parametry.

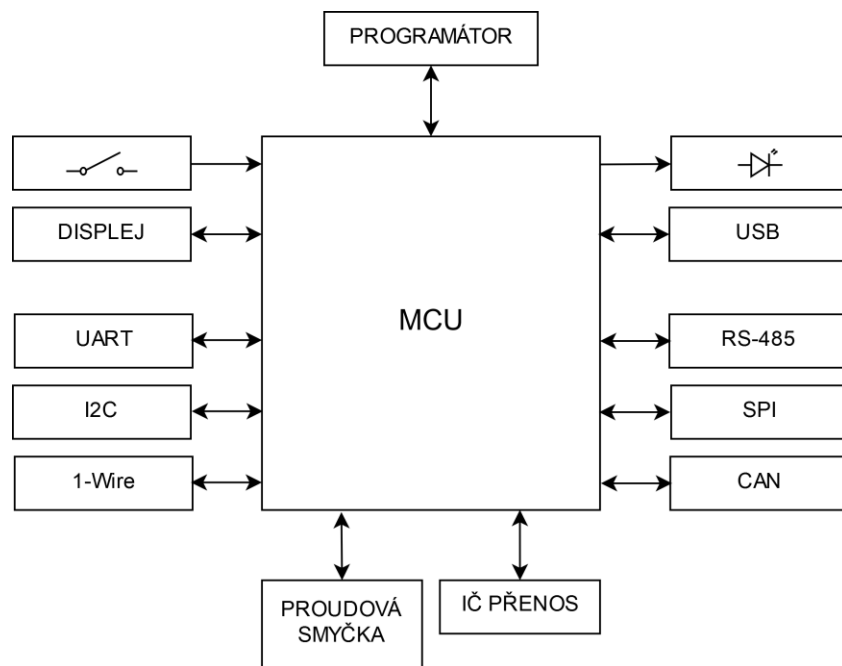


Obrázek 26: Návrh laboratorního přípravku

Dále bude umožněno připojit měřicí zařízení jako osciloskop na jednotlivé vodiče sběrnice a následně sledovat a analyzovat jednotlivé protokoly. Uživateli bude umožněno s přípravkem interagovat a ovlivňovat jeho chod prostřednictvím tlačítek, LED, LCD displeje a USB

rozhraní. Zároveň bude možné přípravek kdykoliv přeprogramovat, takže může sloužit i při výuce programování. Dále bude možné měřit vliv okolního rušení na komunikaci a sledovat například to, jaký vliv na přenos dat má použitý kabel.

Blokové schéma přípravku je zobrazeno na obrázku 27. Mezi implementované sběrnice patří: UART, RS-485, I2C, SPI, 1-Wire, CAN, proudová smyčka a přenos dat pomocí infračerveného světla.



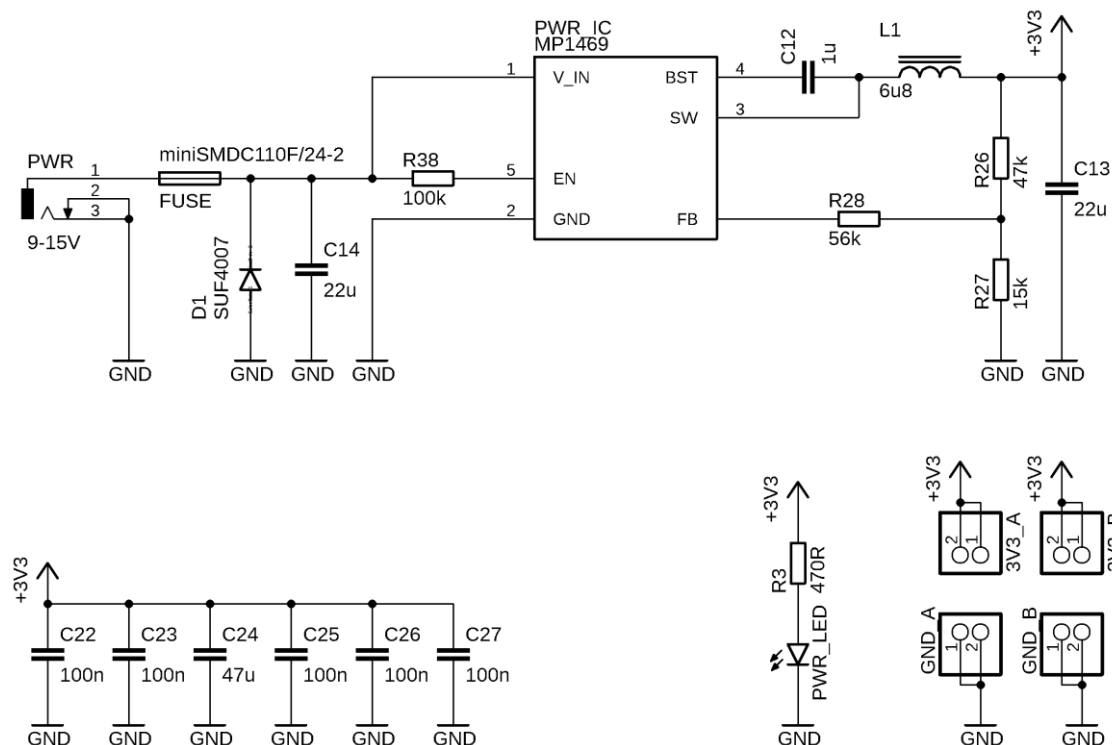
Obrázek 27: Blokové schéma

Programování bude umožněno připojením vhodného programátoru. Návrh byl koncipován tak, aby bylo možné využít běžné výukové a vývojové prostředky, které jsou již k dispozici.

2.1 Napájení

Schéma zapojení napájecí části je zobrazeno na obrázku 28. Napájení bude realizováno externím zdrojem s příslušným konektorem a stejnosměrným napětím v rozsahu 9 – 15 V. Jako ochrana proti přepólování a zkratu slouží vratná pojistka (vypínací proud při pokojové teplotě asi 1 A) a rychlá ochranná dioda D1 [27] [28].

Dále je na přípravku umístěn spínaný zdroj MP1469, na jehož výstupu je přítomno napětí 3,3 V. Zároveň dokáže poskytnout takový proud, aby byla bezpečně pokryta spotřeba navrhovaného zařízení – zdroj je dimenzován na proud 1,5 A – tato hodnota by neměla být za normálního provozu nikdy překročena. Odhad spotřeby (220 mA) je uveden v tabulce 3. Tyto hodnoty vychází buď přímo z katalogových listů, nebo jsou odhadnuty na základě parametrů uvedených v těchto dokumentech, popřípadě odhad vychází z rovnic uvedených v kapitolách zabývajících se návrhem.



Obrázek 28: Schéma zapojení – zdroj

Zjištěné hodnoty byly vždy zaokrouhleny nahoru (na násobek pěti miliampér), jejich přesnost vzhledem k velké rezervě (větší jak 1 A) nehraje roli. Do této rezervy lze zahrnout napájení externích periférií jako například SD karta a jiné. Hodnoty odporu pull-up a pull-down rezistorů se pohybují v řádu jednotek až desítek kiloohmů, poteče jimi tedy proud maximálně v řádu jednotek miliampér, proto je lze zanedbat (viz rovnice 9).

Tabulka 3: Odhad spotřeby laboratorního přípravku

obvod	spotřeba [mA]
MCU	15
tlačítka	5
LED	15
displej	65
proudová smyčka	25
budič RS-485	5
I2C EEPROM	5
1-Wire teploměr	5
IR LED	55
IR přijímač	5
budič CAN	20
<u>celkem</u>	<u>220</u>

V poslední řadě je nutné poznamenat, že výpočet počítá s případem, kdy jsou využívány všechny části navrhovaného zařízení. Zapojení a hodnoty okolních součástek, které pro svůj chod zdroj potřebuje, vychází z doporučených zapojení z katalogového listu [29]. Pomocí rezistoru R38 je uveden integrovaný obvod do chodu. Velikost výstupního napětí U ve voltech se nastavuje rezistory R26 a R27, jejich hodnoty lze vzájemně přepočítat podle vzorce

$$R27 = \frac{R26}{\frac{U}{0,8} - 1} = \frac{47 \cdot 10^3}{\frac{3,3}{0,8} - 1} \cong 15 \text{ [k}\Omega\text{]}. \quad (4)$$

Dále byly přidány konektory pro napájení externích zařízení a červená LED, která indikuje, jestli je přípravek napájen. Velikost předřadného odporu R v ohmech lze určit dle rovnice:

$$R = \frac{U - U_{LED}}{I_{LED}} = \frac{3,3 - 2}{3 \cdot 10^{-3}} \cong 433 \cong 470 \text{ [}\Omega\text{]}, \quad (5)$$

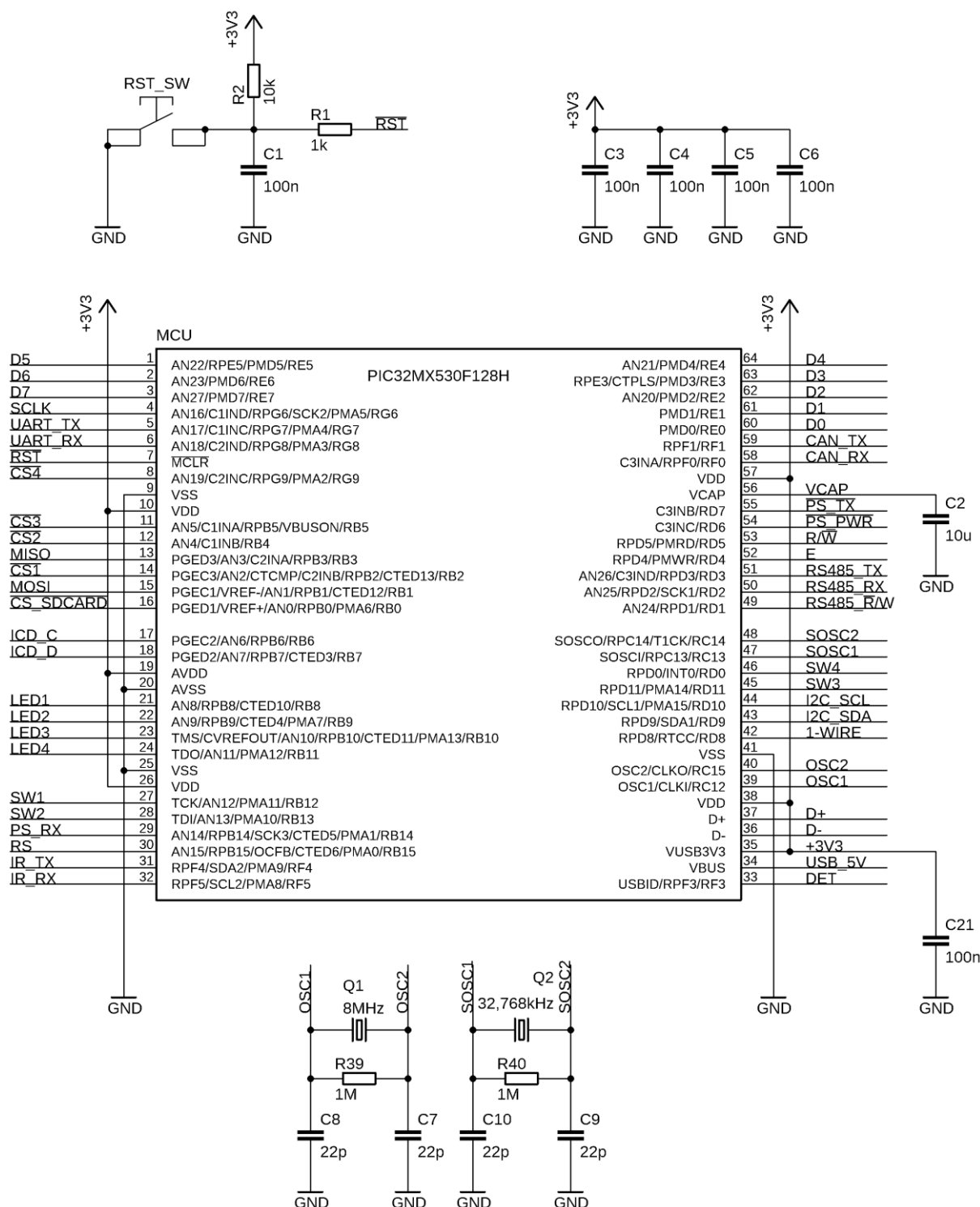
kde U značí napájecí napětí ve voltech (3,3 V), U_{LED} značí úbytek napětí ve voltech na LED (červená LED asi 2 V) a I_{LED} značí proud protékající LED v ampérech (prakticky ověřená hodnota 3 mA). LED tedy poteče proud asi:

$$I_{LED} = \frac{U - U_{LED}}{R} = \frac{3,3 - 2}{470} \cong 2,77 \text{ [mA]}. \quad (6)$$

Ke slotu pro SD kartu a každému integrovanému obvodu byl umístěn blokovací keramický kondenzátor s hodnotou kapacity 100 nF (C22, C23, C25 až C27). Tyto kondenzátory by měly být dle návrhových zásad umístěny k příslušnému obvodu co nejbližší, pokrývají jejich proudové špičky a eliminují šum na napájecím napětí. K infračervené LED byl přidán kondenzátor C24 s hodnotou kapacity 47 μ F pro kompenzaci velkých proudových špiček (cca 50 mA).

2.2 Mikrokontrolér

Vzhledem k tomu, že je k dispozici vybavení pro práci s mikrokontroléry PIC od Microchipu, byl zvolen zástupce právě od této společnosti. Pro tuto konkrétní aplikaci (počet vývodů, integrovaná rozhraní UART, I2C, SPI CAN a USB v potřebném množství – viz tabulka 4) nejlépe vyhovuje PIC32MX530F128H. Schéma zapojení (viz obrázek 29) opět vychází z jeho katalogového listu [30]. Keramické kondenzátory C3, C4, C5 a C6 slouží jako blokovací kondenzátory a měly by být umístěny co nejbližší k MCU. Pull-up rezistor R2 zajišťuje úroveň logické jedničky na resetovacím pinu MCU (negativní logika).



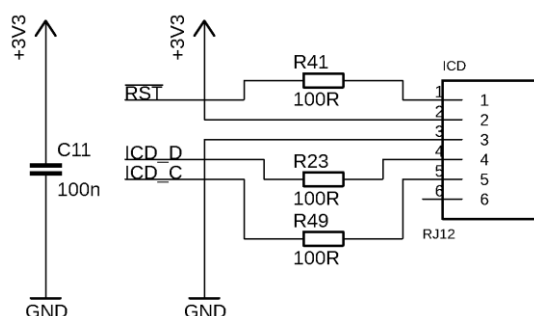
Obrázek 29: Schéma zapojení – mikrokontrolér

Rezistory R39 a R40 nebudou při realizaci navrhovaného zařízení osazeny. Frekvence primárního krystalu byla zvolena 8 MHz, kmitočet sekundárního oscilátoru je dán výrobcem mikrokontroléru – 32 768 kHz.

Tabulka 4: Požadavky na mikrokontrolér

modul	počet [-]
UART	2
I2C	1
SPI	1
CAN	1
USB	1
ADC	1
GPIO	32

Na obrázku 30 je zobrazeno schéma zapojení konektoru programátoru ICD 3 odvozené z návodu k jeho použití [31]. Jako ochrana před elektrostatickými výboji byly na datové vodiče sériově připojeny rezistory, jejichž hodnota by neměla být větší než $100\ \Omega$. Všechny následující rezistory zajišťující ochranu proti elektrostatickým výbojům budou mít hodnotu právě $100\ \Omega$.

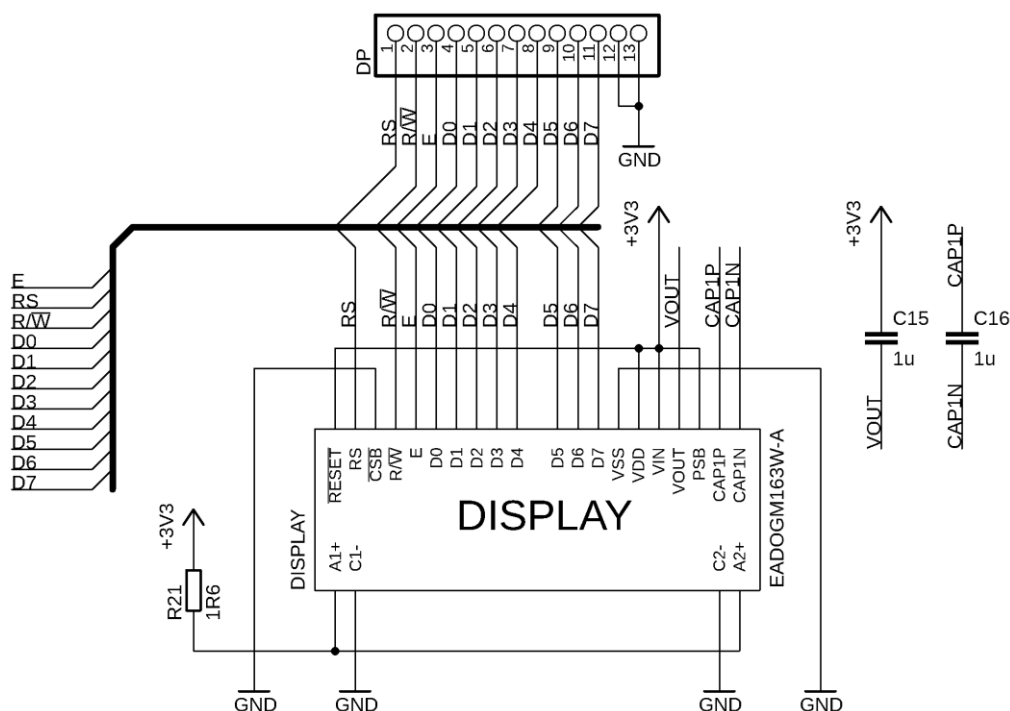


Obrázek 30: Schéma zapojení – programátor

Dále by na tyto vodiče neměly být připojeny jiné součástky. V opačném případě by mohlo docházet k chybám při programování navrhovaného zařízení.

2.3 Uživatelské rozhraní

Ke zobrazování potřebných informací byl použit LCD display EA DOGM163W-A s bílým podsvícením EA LED55x31-W (obrázek 31). Dokáže zobrazit tři řádky textu o šestnácti znacích. Schéma zapojení (včetně hodnot) vychází z jeho datasheetu [32]. Komunikace MCU s displejem bude probíhat přes 8bitovou paralelní sběrnici (11bitovou, pokud počítáme i řídicí vodiče). Nastavení kontrastu probíhá softwarově, nastavení jasu podsvícení je provedeno pomocí rezistoru R21. Dále je zde vyveden konektor pro připojení měřícího zařízení pro potřebu testování.



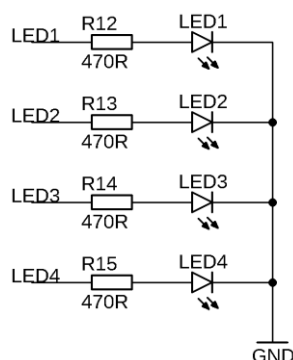
Obrázek 31: Schéma zapojení – displej

Spotřebu podsvícení I (v ampérech) lze určit dle vzorce:

$$I = \frac{U - U_{LED}}{R} = \frac{3,3 - 3,2}{1,6} = 62,5 \text{ [mA]}, \quad (7)$$

kde U značí napájecí napětí ve voltech (3,3 V), U_{LED} značí úbytek napětí na LED podsvícení v paralelním zapojení ve voltech (3,2 V, viz katalogový list) a R značí velikost odporu předřadného rezistoru R21 v ohmech (1,6 Ω , viz katalogový list). Spotřeba zobrazovací části s tekutými krystaly se pohybuje v řádu stovek mikroampér a lze ji zanedbat.

K interakci s uživatelem kromě displeje dále souží oranžové signalizační LED (viz obrázek 32). Vzhledem k podobným parametrům diod jako u LED, která indikuje přítomnost napájecího napětí, je i zde zvolena stejná hodnota odporu předřadných rezistorů (rovnice 5).



Obrázek 32: Schéma zapojení – LED

Spotřeba všech LED I_S (v ampérech, kromě IČ LED) je dána vzorcem:

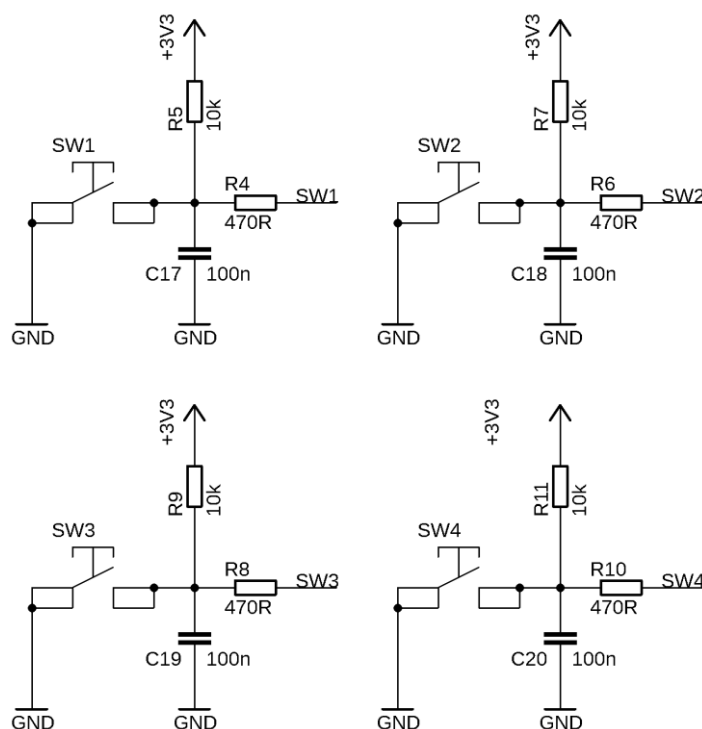
$$I_S = n \cdot I_{LED} = 5 \cdot 2,77 \cdot 10^{-3} \cong 13,83 \text{ [mA]}, \quad (8)$$

kde n značí počet LED (5, bezrozměrné; jedna LED indikující přítomnost napájecího napětí, čtyři signalizační LED) a I_{LED} značí proud jednou LED v ampérech (cca 2,77 mA, viz rovnice 6).

Aby bylo možné nějakým způsobem ovládat chod přípravku, byla přidána čtyři tlačítka (viz obrázek 33). Pokud není tlačítko sepnuto, je na vstupu mikrokontroléru přítomno díky pull-up rezistoru napájecí napětí (úroveň logické jedničky). Hodnota 10 k Ω je pro tyto účely zcela dostačující (odpor nezatěžuje zdroj). Teče jím proud I (v ampérech)

$$I = \frac{U}{R} = \frac{3,3}{10 \cdot 10^3} = 0,33 \text{ [mA]}, \quad (9)$$

kde U je napájecí napětí ve voltech (3,3 V) a R odpor pull-up rezistoru v ohmech. Všechny následující pull-up/pull-down rezistory (kromě těch připojených na vodičích sběrnic) budou mít hodnotu právě 10 k Ω .



Obrázek 33: Schéma zapojení – tlačítka

Kondenzátor pomáhá omezit zákmity tlačítka. Tento kondenzátor nebude při realizaci navrhovaného zařízení osazen a jeho hodnota je pouze orientační – před případným osazením je nutné tuto hodnotu upravit podle potřeby. Zákmity budou ošetřeny softwarově. Pro případ, kdyby byl příslušný pin nakonfigurován jako výstupní, je zde zařazen rezistor omezující proud

tekoucí z/do tohoto pinu. Minimální hodnota tohoto odporu R v ohmech je dána rovnicí:

$$R = \frac{U}{I_{MAX}} = \frac{3,3}{10 \cdot 10^{-3}} = 330 [\Omega], \quad (10)$$

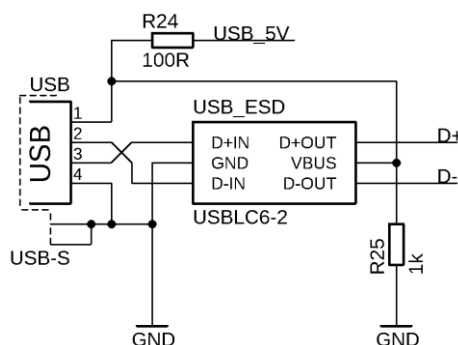
kde U je napájecí napětí ve voltech (3,3 V) a I_{MAX} představuje maximální proud pinem mikrokontroléru v ampérech (10 mA) [30]. Jako výsledná hodnota byla zvolena 470 Ω .

Spotřeba všech tlačítek I_S (v ampérech, včetně resetovacího tlačítka) je dána vzorcem:

$$I_S = n \cdot I = 5 \cdot 0,33 = 1,65 [\text{mA}], \quad (11)$$

kde n značí počet tlačítek (5, bezrozměrné) a I značí proud jedním tlačítkem v ampérech (0,33 mA, viz rovnice 7).

Další možnost jak řídit laboratorní přípravek je použít rozhraní USB (v zapojení pouze pro režim slave). Rezistor R24 (hodnota odporu totožná jako u programátoru; signální vodič USB_5V neslouží pro účely napájení) stejně jako integrovaný obvod v zapojení na obrázku 34 chrání navrhované zařízení před elektrostatickými výboji [33].



Obrázek 34: Schéma zapojení – USB

Úlohou rezistoru R25 je zajistit takový odběr proudu, aby došlo hostitelským počítačem k detekci připojení přípravku. V tomto případě se jedná o proud I (v ampérech) o velikosti dané rovnicí:

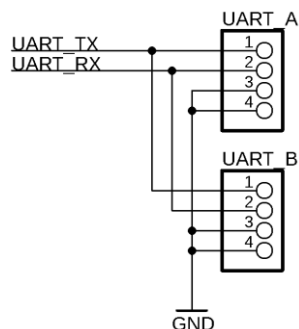
$$I = \frac{U}{R} = \frac{5}{1 \cdot 10^3} = 5 [\text{mA}], \quad (12)$$

kde U značí napájecí napětí sběrnice USB (5 V, ve voltech) a R značí velikost odporu rezistoru R25 v ohmech (1 k Ω).

2.4 Sběrnice

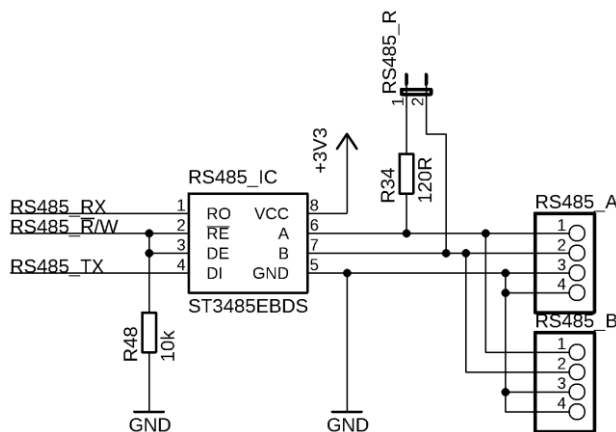
Aby bylo možné přípravky různě propojovat a zároveň provádět měření, byl ke každé

sběrnici přidán příslušný počet konektorů Schéma zapojení sběrnice UART je zobrazeno na obrázku 35.



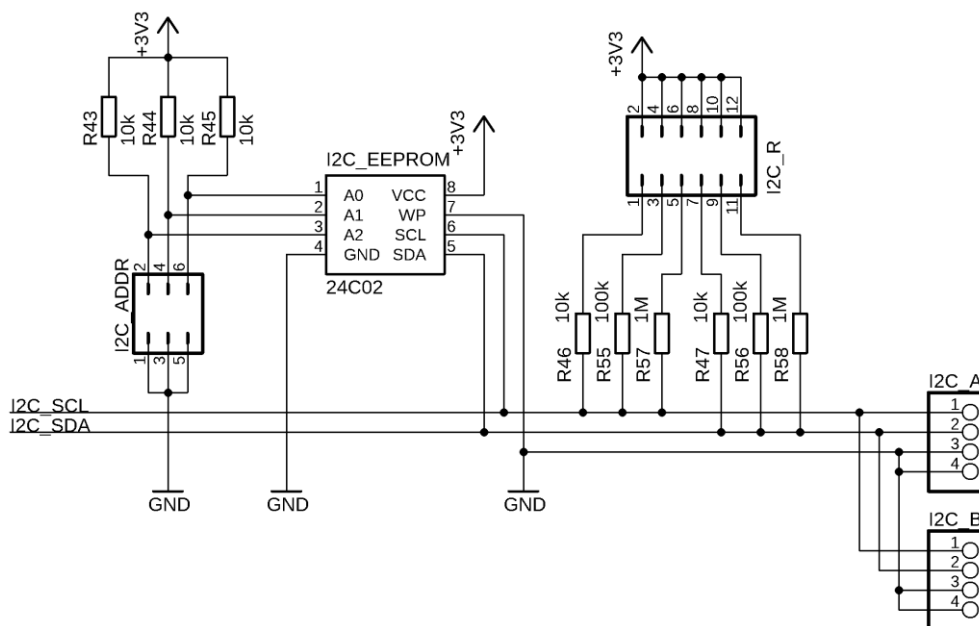
Obrázek 35: Schéma zapojení – UART

Na obrázku 36 je zobrazeno schéma zapojení sběrnice RS-485. Je zde použit budič/převodník UART na RS-485, který dokáže pracovat s napájecím napětím 3,3 V [34]. Aby nedocházelo vlivem okolního rušení k odesílání neplatných dat v době, kdy je mikrokontrolér například programován, je na piny RE a DE převodníku připojen pull-down rezistor. Pomocí propojky (jumperu) je možné na sběrnici připojit zakončovací rezistor o doporučené hodnotě odporu $120\ \Omega$ (jedná se o velikost charakteristické impedance vedení – kroucené dvojlinky) [14].



Obrázek 36: Schéma zapojení – RS-485

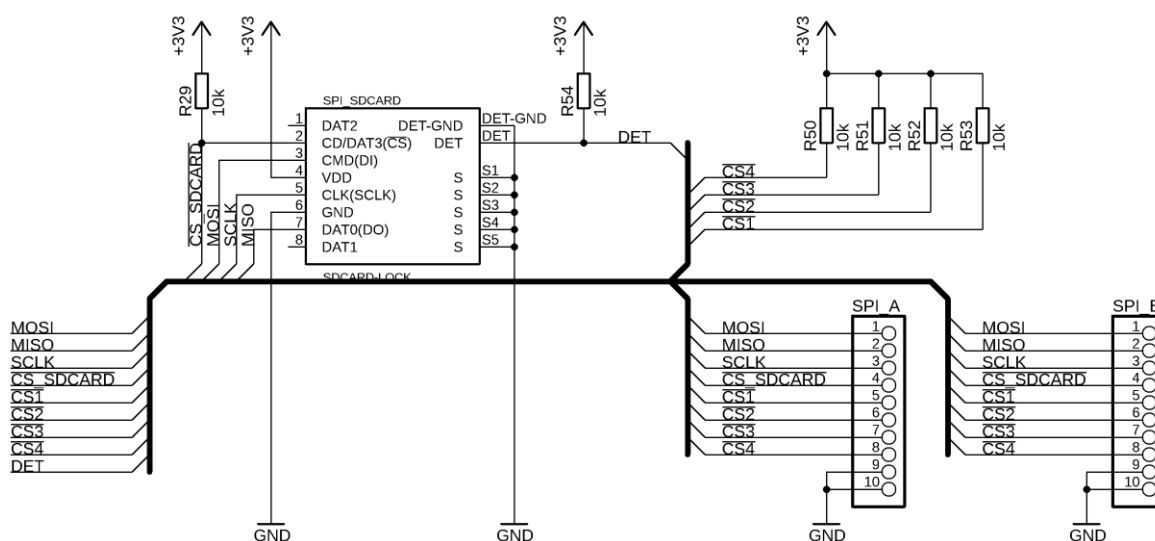
Schéma zapojení sběrnice I2C je zobrazeno na obrázku 37. Pomocí propojek je možné připojit na jednotlivé vodiče pull-up rezistory (R46, R47; na každý vodič vždy pouze jeden rezistor současně). Doporučená hodnota velikosti jejich odporu je v řádu jednotek kiloohmů [18]. Proto byla zvolena hodnota $10\ \text{k}\Omega$. Aby bylo možné simulovat stav, kdy je parazitní kapacita vedení nabíjena příliš pomalu, byly dále přidány rezistory s hodnotami odporů $100\ \text{k}\Omega$ a $1\ \text{M}\Omega$ (R55 až R58; dle Ohmova zákona s rostoucím odporem klesá proud; logaritmické odstupňování). Je tedy možné sledovat a měřit vliv hodnoty odporu pull-up rezistoru na maximální přenosovou rychlost.



Obrázek 37: Schéma zapojení – I2C

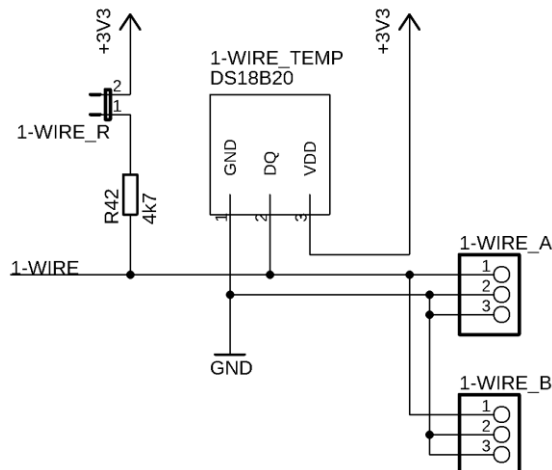
Přímo na přípravku bude umístěna paměť EEPROM AT24C02C s kapacitou 2 kbit ($256 \cdot 8$ bitů), se kterou bude možné komunikovat [35]. Dokáže pracovat s jednotlivými bajty i se stránkami (skupina více bajtů). Nastavení části její adresy se provádí také propojkami a pomocí pull-up rezistorů R43 až R45.

Schéma zapojení sběrnice SPI je zobrazeno na obrázku 38. Na přípravku bude přítomný slot pro SD kartu. Použitý slot umožňuje detekci přítomnosti karty – pokud je karta vložena, na vodiči DET je přítomen nulový potenciál. Na všechny vodiče, které jsou používány jako CS/SS, je připojen pull-up rezistor. Lze tak alespoň minimálně zabránit vzniku kolize v případě výskytu chyby.



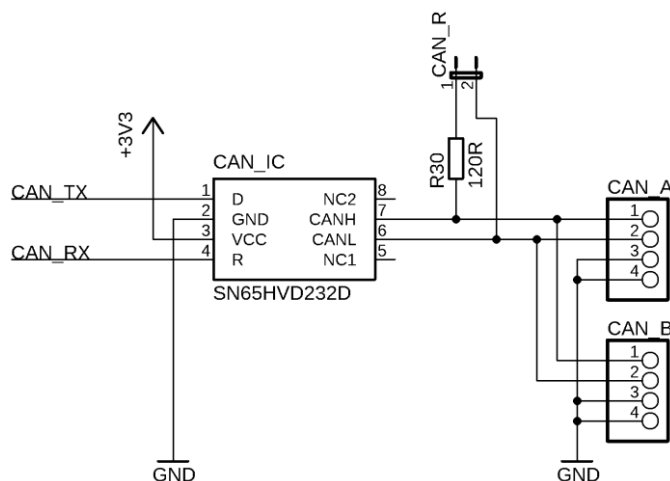
Obrázek 38: Schéma zapojení – SPI

Schéma zapojení sběrnice 1-Wire je zobrazeno na obrázku 39. Na vodič je možné pomocí propojky připojit pull-up rezistor (hodnota odporu dle datasheetu periferie). Na přípravku bude k dispozici teplotní čidlo DS18B20 s rozsahem -55 až $+125$ °C, které dokáže měřit s přesností až $0,5$ °C a poskytuje rozlišení až 12 bitů [20].



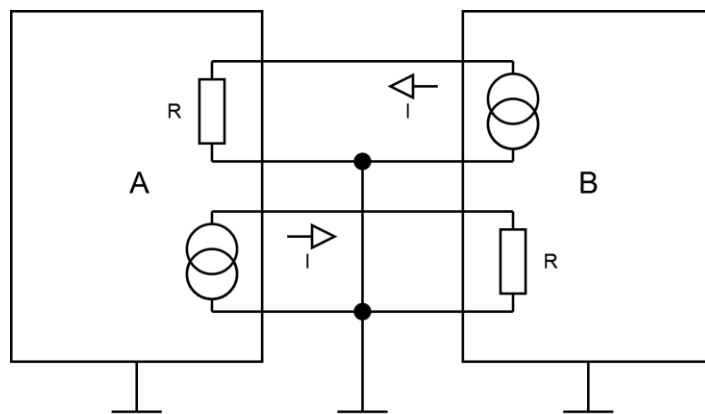
Obrázek 39: Schéma zapojení – 1-Wire

Na obrázku 40 je zobrazeno schéma zapojení sběrnice CAN. Je zde využito budiče, který dokáže pracovat s napájecím napětím 3,3V [36]. Pomocí propojky je možné připojit mezi vodiče zakončovací rezistor (s hodnotou odporu odpovídající charakteristické impedanci vedení – kroucené dvojlinky) [14].



Obrázek 40: Schéma zapojení – CAN

Propojení dvou přípravků pomocí proudové smyčky tak, aby byla umožněna obousměrná komunikace, je zobrazeno na obrázku 41.



Obrázek 41: Propojení dvou přípravků pomocí proudové smyčky

Schéma zapojení proudové smyčky 4 – 20 mA (popřípadě 0 – 20 mA) je zobrazeno na obrázku 42. Tranzistor T3 slouží pouze k zapnutí či vypnutí tohoto obvodu. Je nutné, aby na něm byl co nejmenší úbytek napětí, aby co nejméně omezoval provoz proudové smyčky [37]. Precizní výpočet hodnoty odporu rezistorů R19 a R37 není nutný, omezují přenos náboje do hradel tranzistorů T3 a T4 – rychlost jejich sepnutí není klíčová a teče jimi malý proud (řád jednotek miliampér). Rezistor R36 zajišťuje vypnutí v případě, že se se smyčkou nepracuje. Obdobně rezistor R35 zajišťuje odpojení větve s rezistorem R18 pokud není tranzistor T4 ovládán mikroprocesorem.

Samotný zdroj proudu realizují bipolární PNP tranzistory T1 a T2. Na přechodu báze emitor tranzistoru T1 se ustálí napětí asi 0,65 V, toto napětí je převedeno rezistorem R17 (popřípadě paralelní kombinací rezistorů R17 a R18 – jejich velikost byla určena experimentálně pomocí simulace) na proud, který následně teče do zátěže. Velikost odporu R16 nemá výrazný vliv funkci obvodu, přesto je jeho přítomnost klíčová. Simulací bylo ověřeno, že hodnota 1 kΩ je dostačující. Rezistor R22 je zde proto, aby omezil případné proudové špičky při připojení nulového odporu na nezatížený plně otevřený tranzistor T2. Jeho hodnota odporu byla opět ověřena pomocí simulace.

Rezistor R20 souží jako snímací převodník proudu na napětí pro ADC (analogově digitální převodník). Za předpokladu, že na přechodu kolektor emitor tranzistoru T2 bude nulové napětí (tranzistor je plně otevřen), lze teoretickou maximální hodnotu odporu R v ohmech, s jakou lze tento obvod zatížit, určit dle rovnice:

$$R = \frac{U - U_{BE}}{I_{max}} = \frac{3,3 - 0,65}{20 \cdot 10^{-3}} = 132,5 [\Omega], \quad (13)$$

kde U značí napájecí napětí ve voltech (3,3 V), U_{BE} značí napětí na přechodu báze emitor tranzistorů T1 a T2 ve voltech (jsou stejné, 0,65 V) a I_{max} značí maximální proud, jaký má zdroj dodávat v ampérech (20 mA).

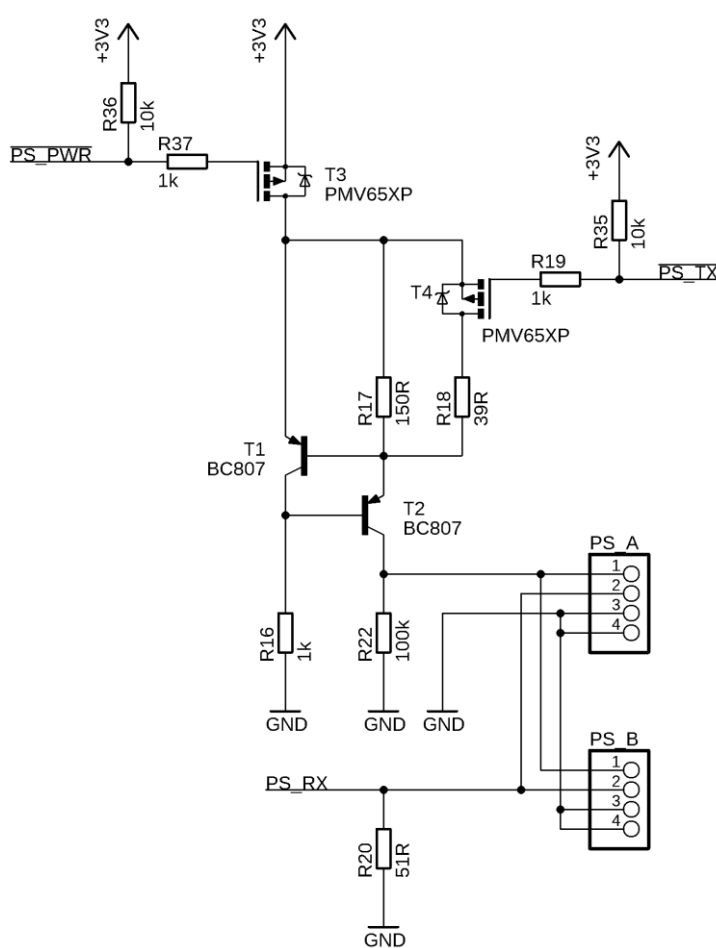
Maximální spotřeba zdroje proudu proudové smyčky I_S (v ampérech) je dána rovnicemi:

$$I_L = \frac{U - 2 \cdot U_{BE}}{R} = \frac{3,3 - 2 \cdot 0,65}{1 \cdot 10^3} = 2 \text{ [mA]}, \quad (14)$$

kde I_L značí proud rezistorem R16 (v ampérech), U značí napájecí napětí ve voltech (3,3 V), U_{BE} značí napětí na přechodu báze-emitor křemíkového bipolárního tranzistoru ve voltech (asi 0,65 V) a R značí hodnotu odporu rezistoru R16 v ohmech (1 k Ω). Dále:

$$I_S = I_L + I_{OUT} = 2 \cdot 10^{-3} + 20 \cdot 10^{-3} = 22 \text{ [mA]}, \quad (15)$$

kde I_{OUT} značí výstupní proud tohoto zdroje v ampérech (vyšší hodnota 20 mA).



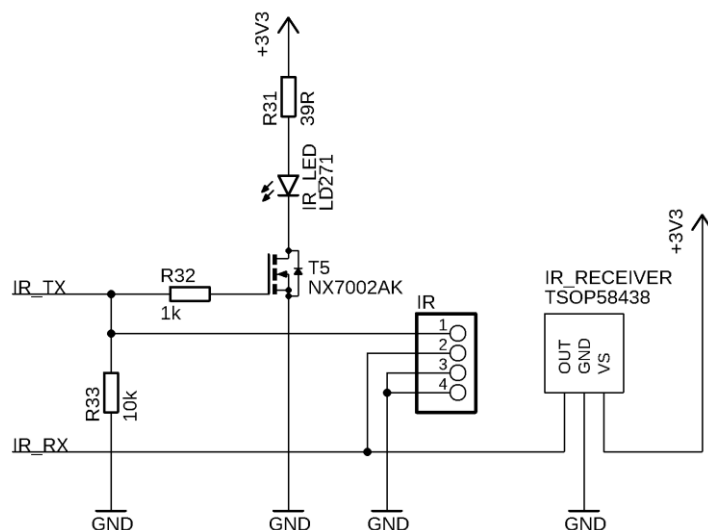
Obrázek 42: Schéma zapojení – proudová smyčka

Schéma zapojení obvodu, který realizuje přenos informace pomocí infračerveného světla, je na obrázku 43. IČ LED je spínána přes tranzistor T5 s nízkým odporem v sepnutém stavu [38]. Aby IČ světlo dosáhlo dostatečné intenzity pro přenos dat, je předřadný rezistor (R31) dimenzován tak, aby LED tekla proud I asi 50 mA (v rovnici 16 v ampérech). V sepnutém stavu je při tomto proudu na LED úbytek U_{LED} asi 1,25 V (maximálně 1,5 V, v rovnici 16

ve voltech) [39]. Předřadný odpor R v ohmech lze určit dle rovnice:

$$R = \frac{U - U_{LED}}{I} = \frac{3,3 - 1,25}{50 \cdot 10^{-3}} = 41 \cong 39 [\Omega], \quad (16)$$

kde U značí napájecí napětí ve voltech (3,3 V).



Obrázek 43: Schéma zapojení – infračervený přenos dat

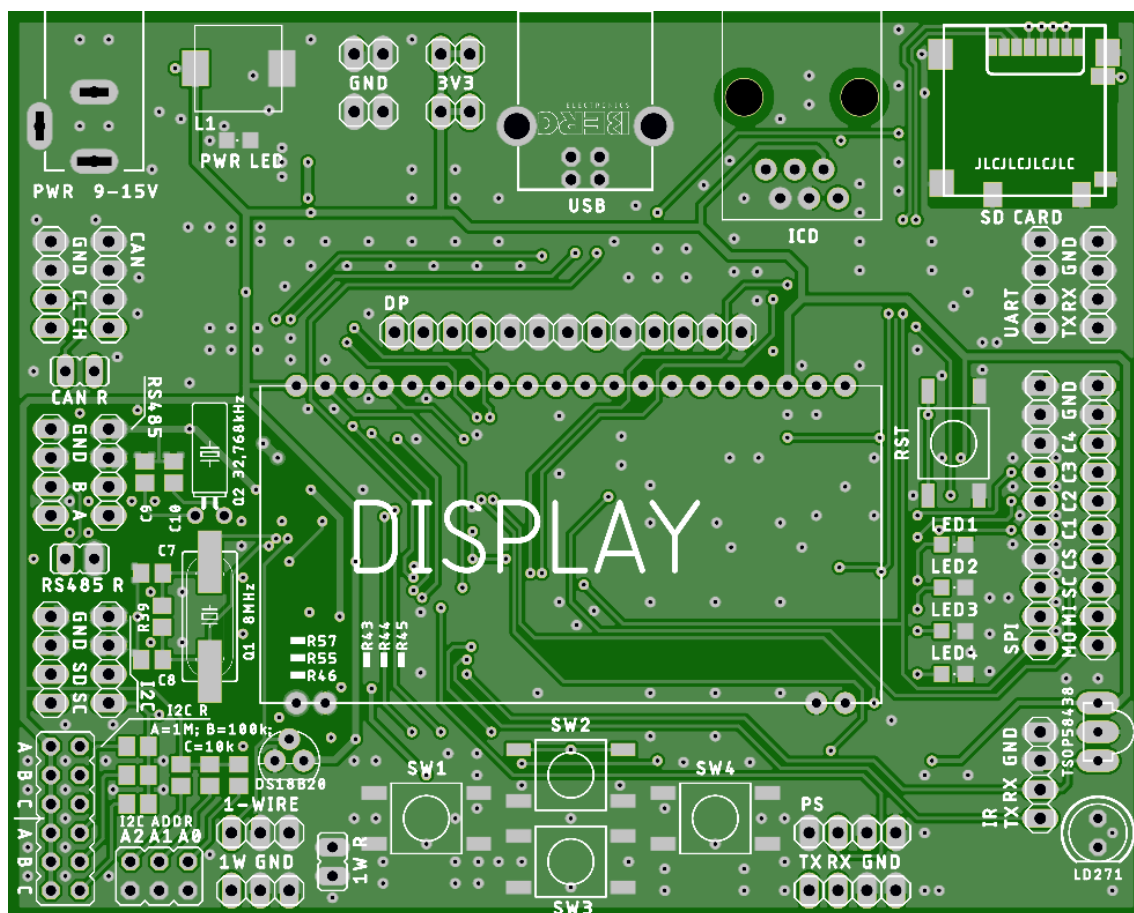
Signál bude modulován s frekvencí 38 kHz. Příjem a zpětnou demodulaci provádí přijímač [40]. Význam rezistoru R32 je obdobný jako u rezistorů R19 a R37 – omezuje přenos náboje do hradla tranzistoru T5. Rychlost sepnutí není klíčová a IR LED teče malý proud (řád desítek miliampér), proto není nutný precizní výpočet rezistoru R32. Pull-down rezistor R33 zajišťuje, že IR LED bude během toho, co se s ní nepracuje, vypnuta.

3 REALIZACE LABORATORNÍHO PŘÍPRAVKU

Tato část práce popisuje návrh a výrobu desky plošných spojů, včetně zvolených parametrů. Dále osazení a oživení laboratorního přípravku, nakonec ověření jeho funkčnosti.

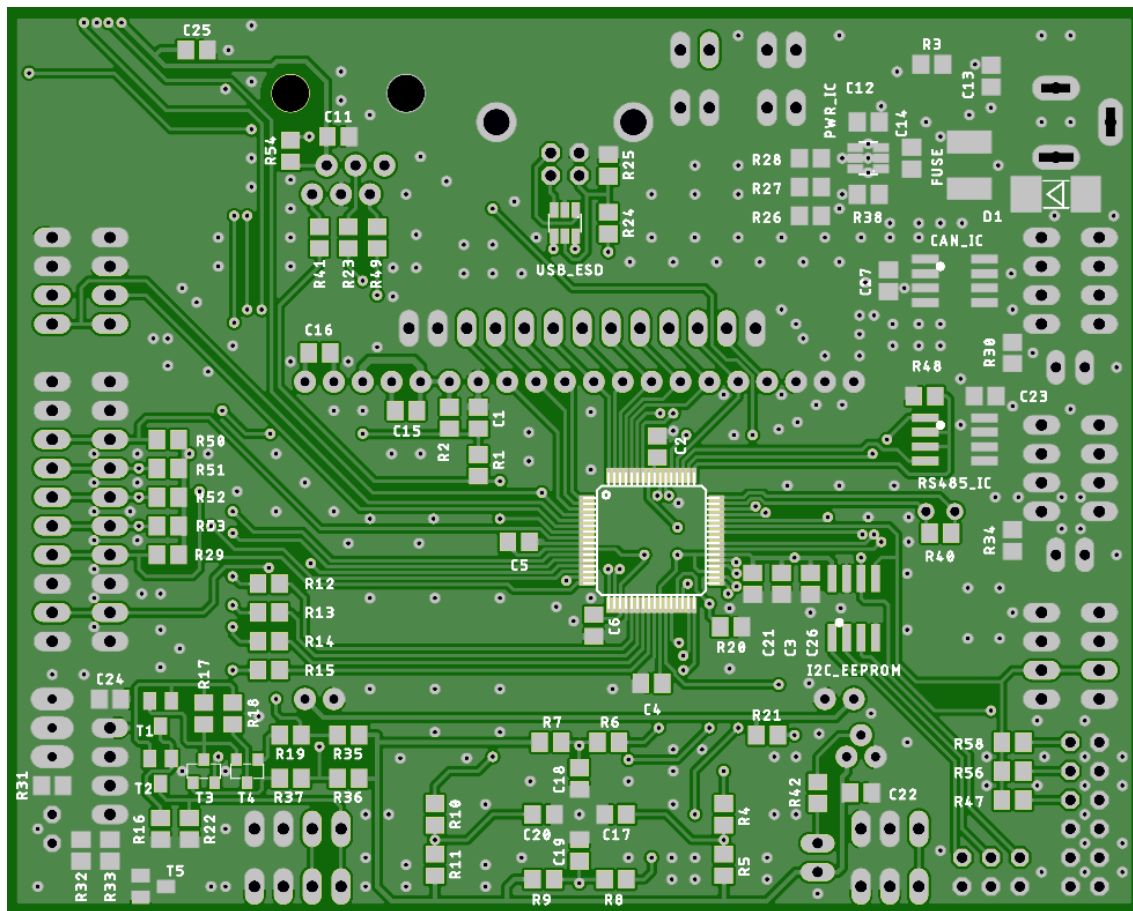
3.1 Návrh a výroba desky plošných spojů

Návrh DPS (desky plošných spojů) byl proveden v návrhovém prostředí Eagle (viz elektronická příloha práce). Pro většinu součástek musely být buď upraveny stávající, nebo vytvořeny nové knihovny součástek. Jedná se o dvouvrstvou DPS s délkou 10 cm a výškou 8 cm. Strategie byla nejprve umístit do středu hlavní komponenty – displej a mikroprocesor, dále situovat veškeré konektory k okrajům a následně provést zapojení všech ostatních součástek. Pokud to bylo možné, byly veškeré komponenty umístěny na spodní stranu DPS (zvolené rozměry nedovolovaly umístit je na jednu stranu). Výsledný návrh je zobrazen na obrázcích 44 a 45.



Obrázek 44: Návrh DPS – horní strana, měřítko M1,5:1

Na obou stranách byl vytvořen polygon se zemním potenciálem. Aby byly minimalizovány zemní smyčky, byly do návrhu vhodně doplněny prokovy.



Obrázek 45: Návrh DPS – spodní strana, měřítko M1,5:1

Při tvorbě designu byl kladen důraz na to, aby byly dodrženy zásady správného návrhu – dodržet doporučený layout součástek, umístit blokovací kondenzátory a krystaly co nejblíže k danému integrovanému obvodu, vést vodiče sběrnic co nejkratšími možnými cestami a podobně. S ohledem na možnosti autora (ruční osazování) byla zvolena velikost veškerých čipových součástek 0805. Řada rezistorů je E24. Byl brán zřetel na to, aby nebylo překročeno maximální výkonové zatížení jednotlivých komponent. Šířka jednotlivých cest je:

- **pro „pojistkový“ okruh:** 50 mil (1,27 mm),
- **pro hlavní napájecí cesty:** 24 mil (asi 0,61 mm),
- **pro vedlejší napájecí cesty:** 16 mil (asi 0,41 mm),
- **pro ostatní:** 12 mil (asi 0,30 mm).

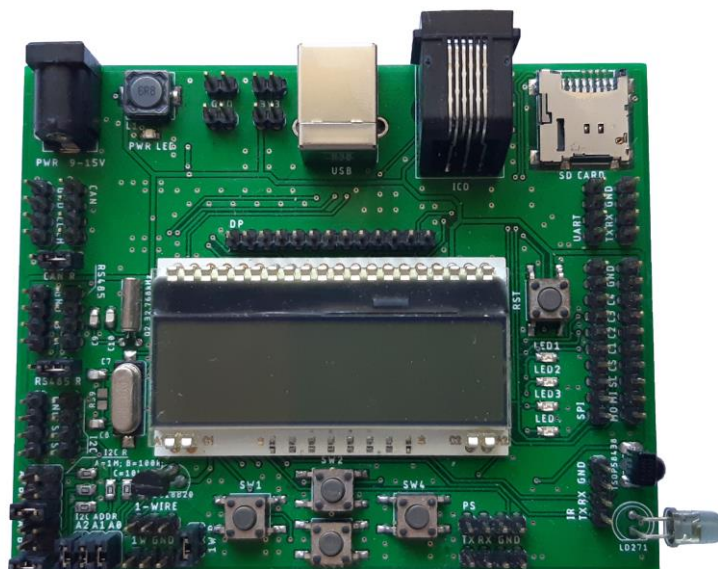
Byly dodrženy veškeré parametry dle požadavků vybraného zahraničního výrobce JLCPCB [41]. Skutečná DPS má tyto parametry:

- **materiál substrátu a jeho tloušťka:** FR4 (teplota skelného přechodu T_g 130 až 140 °C), 1,6 mm,

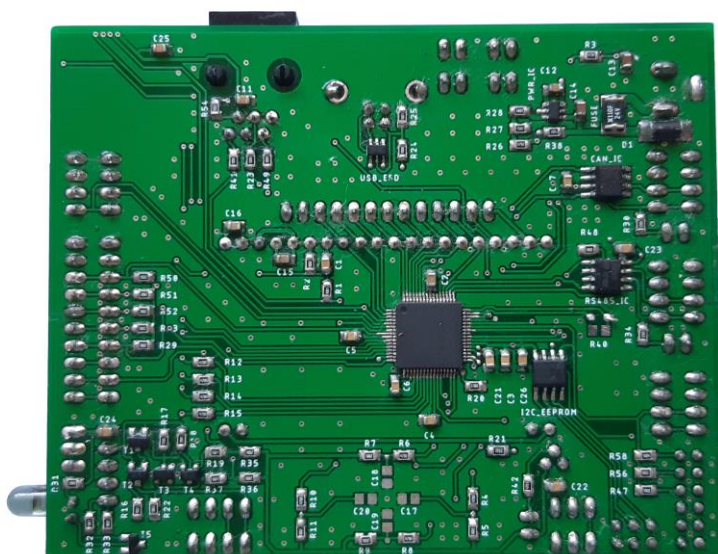
- **tloušťka mědi:** 1 oz (35 μm),
- **nepájivá maska a servisní potisk:** zelená, bílý,
- **povrchová úprava:** olovnatý HASL (hot air solder leveling).

3.2 Osazení desky plošných spojů a oživení

Osazení desky plošných spojů bylo provedeno ručně. Výsledek je zobrazen na obrázcích 46 a 47.



Obrázek 46: Osazení desky plošných spojů – horní strana

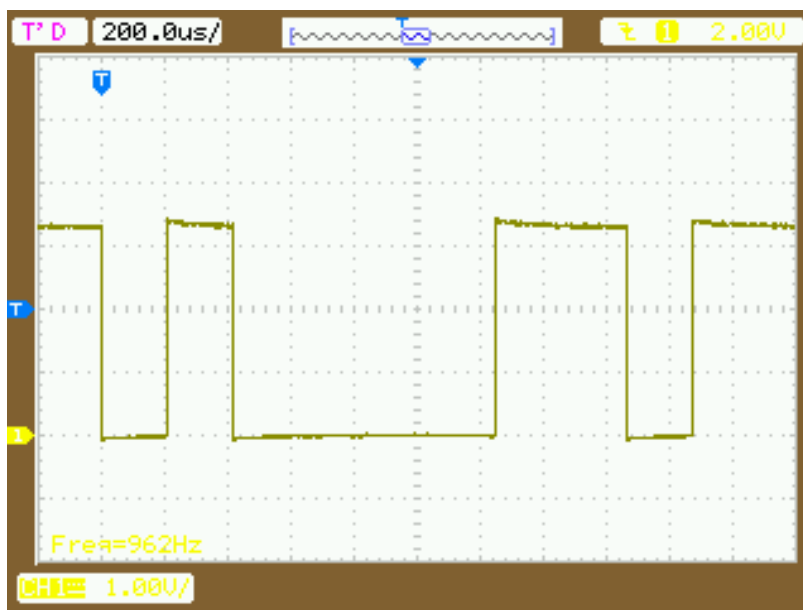


Obrázek 47: Osazení desky plošných spojů – spodní strana

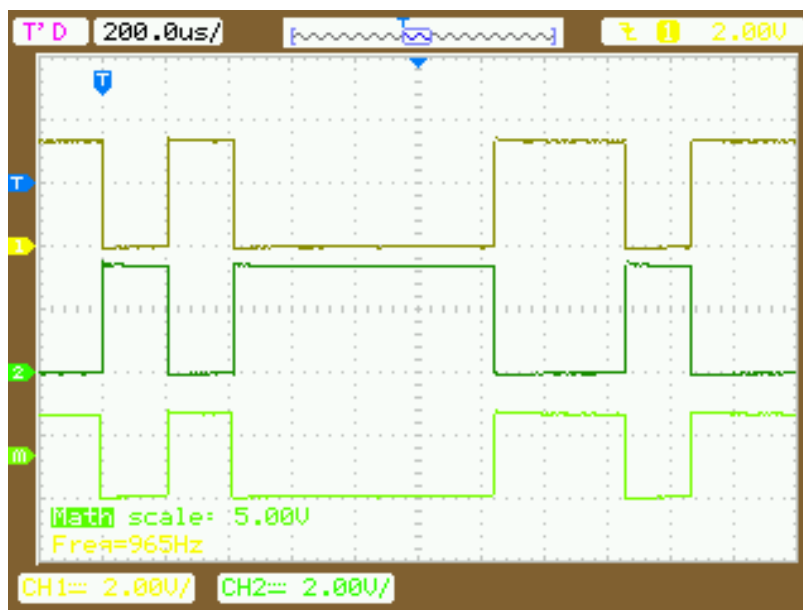
Následně byla provedena optická kontrola pájených spojů, s pomocí multimetru bylo testováno, zda se na DPS nenachází zkratky, studené spoje a podobně. Případné nedostatky byly ihned odstraněny. Přípravek byl připojen ke zdroji napájecího napětí, byla ověřena správná funkce spínaného zdroje. Nakonec byl do mikrokontroléru úspěšně nahrán první program.

3.3 Ověření funkčnosti laboratorního přípravku

Při testování vývojového přípravku byl použit osciloskop Agilent Technologies DSO1002A (60 MHz, $2 \text{ GSa} \cdot \text{s}^{-1}$), sériové číslo CN49312683, verze softwaru 011.04.00.04.02. Průběh závislosti napětí na čase na TX pinu UART sběrnice při odesílání znaku „a“ (0110 0001 binárně) je zobrazen na obrázku 48. Přenos začíná start bitem, následuje binární hodnota znaku od nejméně po nejvíce významný bit, nakonec je zpráva ukončena stop bitem. Modulační rychlost modulu byla nastavena na 4 800 Bd. Obdobná situace je zobrazena na obrázku 49, zde však dochází k přenosu pomocí sběrnice RS-485 (využívá se ovšem stejného protokolu). V pořadí shora dolů je zobrazen průběh na vodiči A, na vodiči B a rozdíl napětí těchto vodičů (A–B).

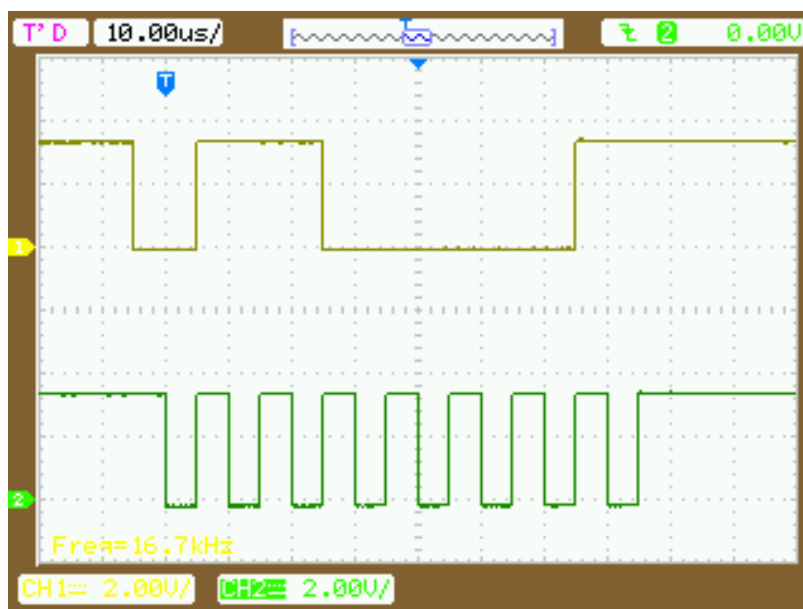


Obrázek 48: Časová závislost napětí na sběrnici UART



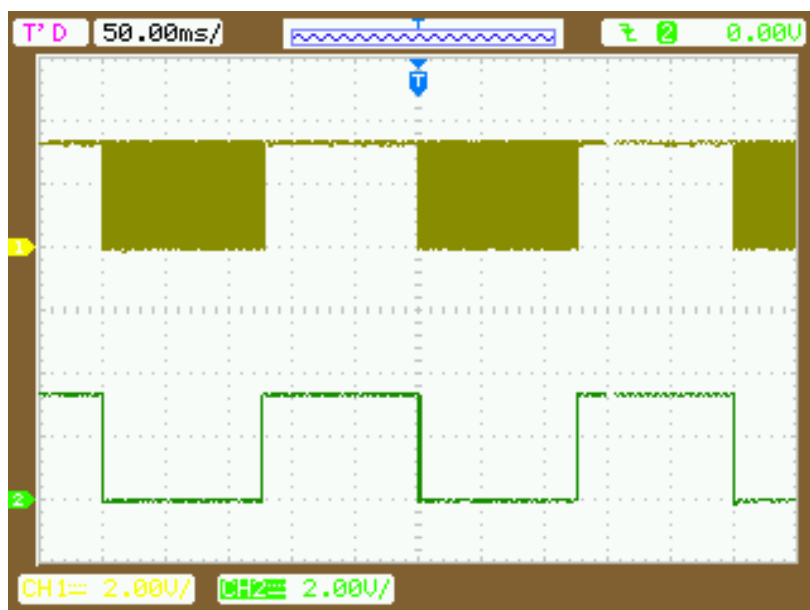
Obrázek 49: Časová závislost (rozdílu) napětí na sběrnici RS-485

Odesílání stejného znaku sběrnici SPI je zobrazeno na obrázku 50. Horní průběh znázorňuje datový vodič MOSI, spodní průběh vodič SCLK. Jeho klidový stav je v úrovni logické jedničky, data jsou platná při sestupné hraně, k jejich změně dochází při náběžné hraně. Pořadí bitů je od nejvíce po nejméně významný. Není zde potřeba žádného dalšího (například řídicího) bitu.



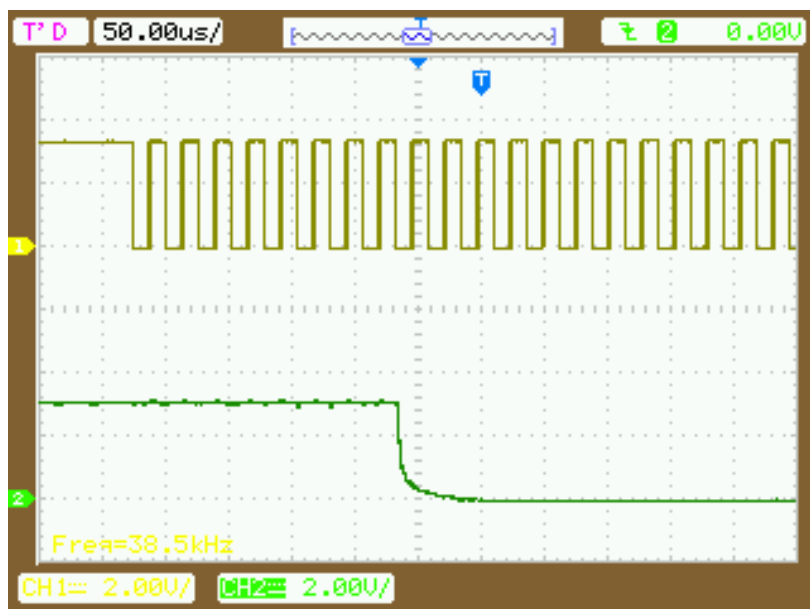
Obrázek 50: Časová závislost napětí na sběrnici SPI

Na obrázku 51 je zobrazena časová závislost napětí na infračervené diodě (nahore) a na výstupu přijímače (dole). Pokud přijímač detekuje světelný signál o správné frekvenci, na jeho výstupu je přítomen nulový potenciál, v opačném případě napájecí napětí.



Obrázek 51: Časová závislost napětí na infračervené diodě a na výstupu přijímače

Obrázek 52 zachycuje detail těchto průběhů. Je zde patrné mírné zpoždění signálu na výstupu přijímače. Frekvence nosného signálu je 38,5 kHz.



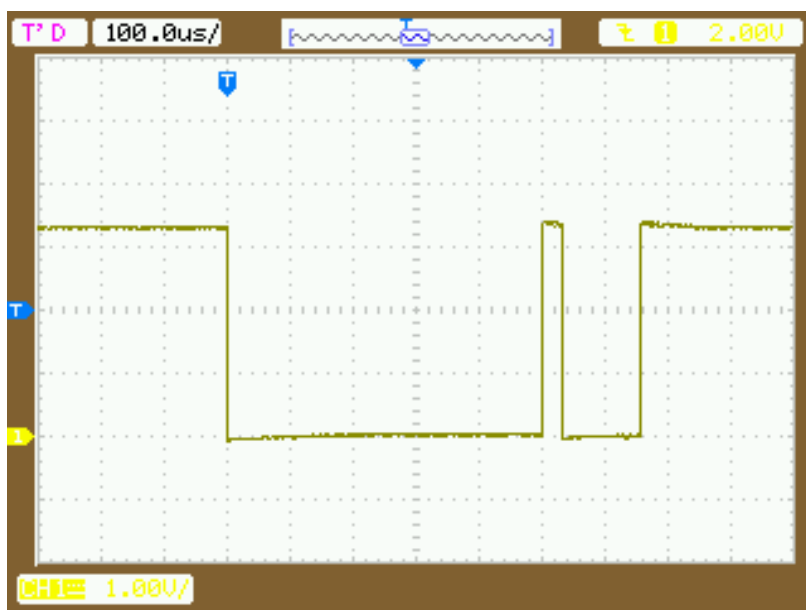
Obrázek 52: Detail časové závislosti napětí na infračervené diodě a na výstupu přijímače

Testování zdroje proudu proudové smyčky je zobrazeno na obrázku 53. Proud je snímán pomocí rezistoru s hodnotou odporu $51\ \Omega$. Tomu odpovídá velikost naměřeného napětí. Periodicky je střídána hodnota proudu 0, 4 a 20 mA.



Obrázek 53: Časová závislost napětí (proudu) zdroje proudu proudové smyčky

Na obrázcích 54 a 55 jsou znázorněny průběhy napětí v závislosti na čase na datovém vodiči sběrnice 1-Wire. Na prvním z nich je zachycena inicializace komunikace a odpověď teplotního senzoru. Na druhém mikrokontrolér odesílá ROM příkaz přeskočit identifikaci (1100 1100 binárně, od LSB po MSB). Je možné zahlédnout zde i čtyři nejméně významné bity příkazu pro měření teploty (0100 0100 binárně.)

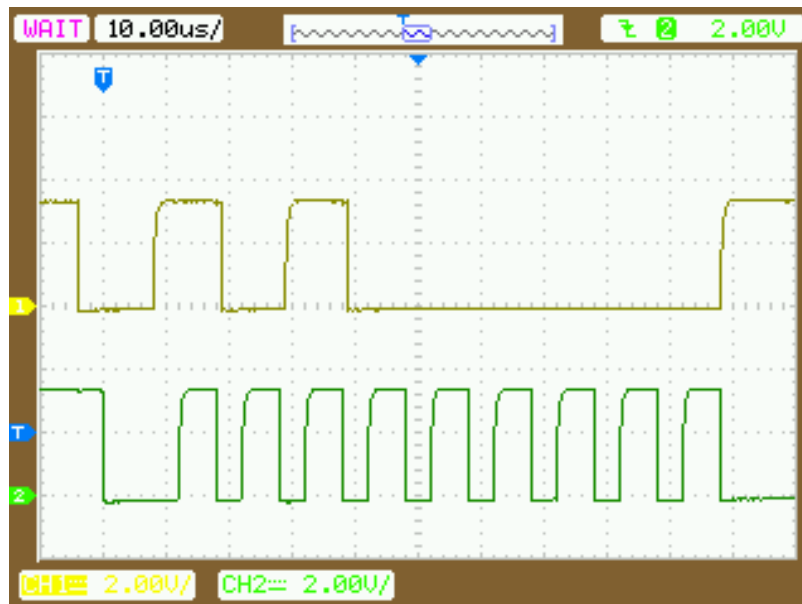


Obrázek 54: Časová závislost napětí na sběrnici 1-Wire – inicializace komunikace



Obrázek 55: Časová závislost napětí na sběrnici 1-Wire – příkazy

Zápis dat do paměti EEPROM je zobrazen na obrázcích 56 (start; adresa EEPROM – 101 0000 binárně; zápis 0; ACK 0), 57 (adresa, kam se budou data zapisovat 0; ACK 0) a 58 (data – znak „a“ – 0110 0001 binárně; ACK 0; stop). Nahoře jsou data, dole hodinový signál. Bity jsou v pořadí od MSB po LSB.



Obrázek 56: Časová závislost napětí na sběrnici I2C – zápis dat 1



Obrázek 57: Časová závislost napětí na sběrnici I2C – zápis dat 2

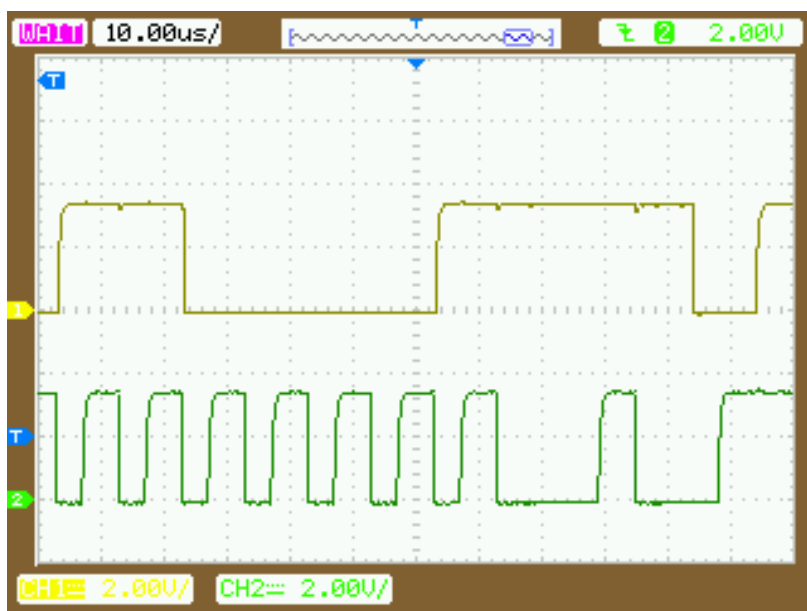


Obrázek 58: Časová závislost napětí na sběrnici I2C – zápis dat 3

Při čtení dat ze stejného integrovaného obvodu a stejné adresy v této paměti jsou první dva kroky totožné – slouží pro odeslání adresy, se kterou se bude pracovat. Následuje obdobná sekvence jako při prvním kroku při zápisu dat (viz obrázek 59), avšak R/W bit je ve stavu logické jedničky. Následně jsou data vyčtena (obrázek 60), je odeslán NACK (logická jednička) a stop podmínka.

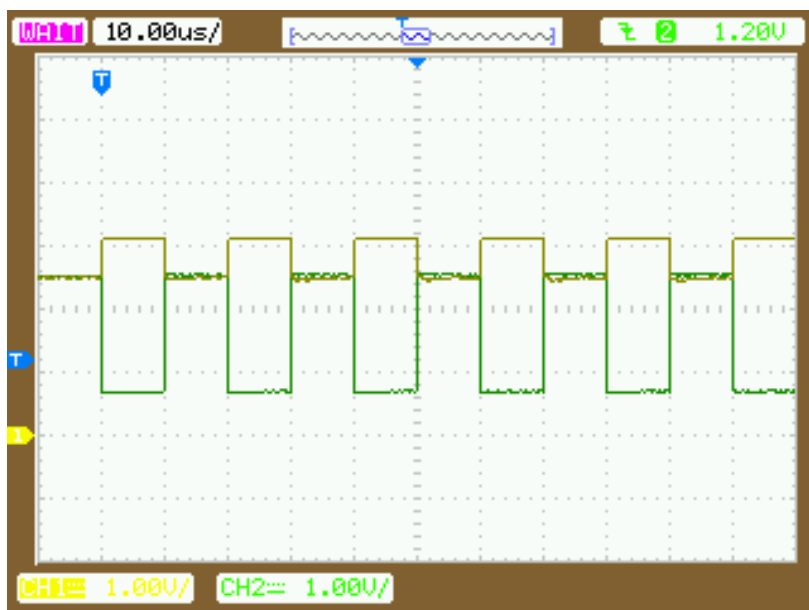


Obrázek 59: Časová závislost napětí na sběrnici I2C – čtení dat 1



Obrázek 60: Časová závislost napětí na sběrnici I2C – čtení dat 2

Závislosti napětí na čase na vodičích sběrnice CAN jsou zobrazeny na obrázku 61 (CANH žlutě, CANL zeleně). Modulační rychlost je nastavena na 100 kBd.

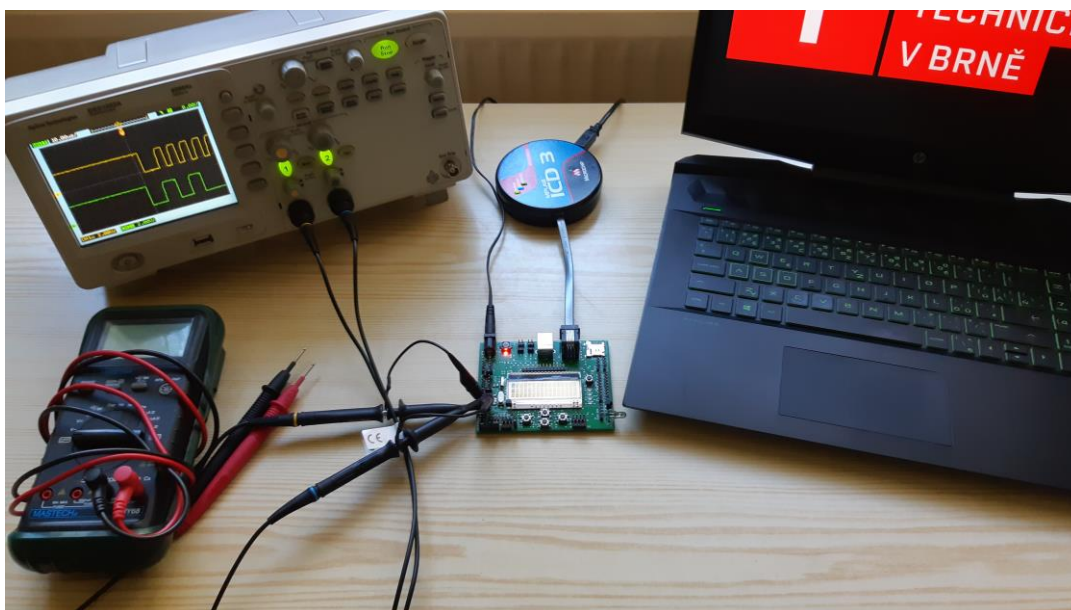


Obrázek 61: Časová závislost napětí na sběrnici CAN

Komunikace je započata start bitem v dominantním stavu (logická nula). Následně je odeslána adresa vysílajícího zařízení (zde 101 0101 0101 binárně).

4 NÁVRH LABORATORNÍCH ÚLOH

Laboratorní úlohy nebudou mít pevné zadání. K dispozici bude sada knihoven se základními funkcemi a vzorové programy (viz elektronická příloha práce). Uživatel je bude moci nahrát do vývojového přípravku a následně bude možné pozorovat chování vybrané sběrnice (například na osciloskopu) a analyzovat její protokol. Při tom bude možné například měnit velikost odporu pull-up rezistorů. Dále bude možné vytvářet libovolné modifikace programů dle vlastního uvážení. Ukázka pracoviště je zobrazena na obrázku 62.

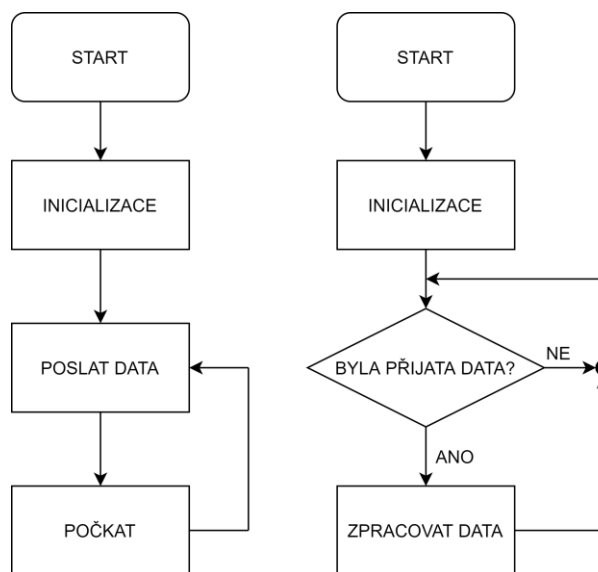


Obrázek 62: Ukázka pracoviště pro práci s přípravkem

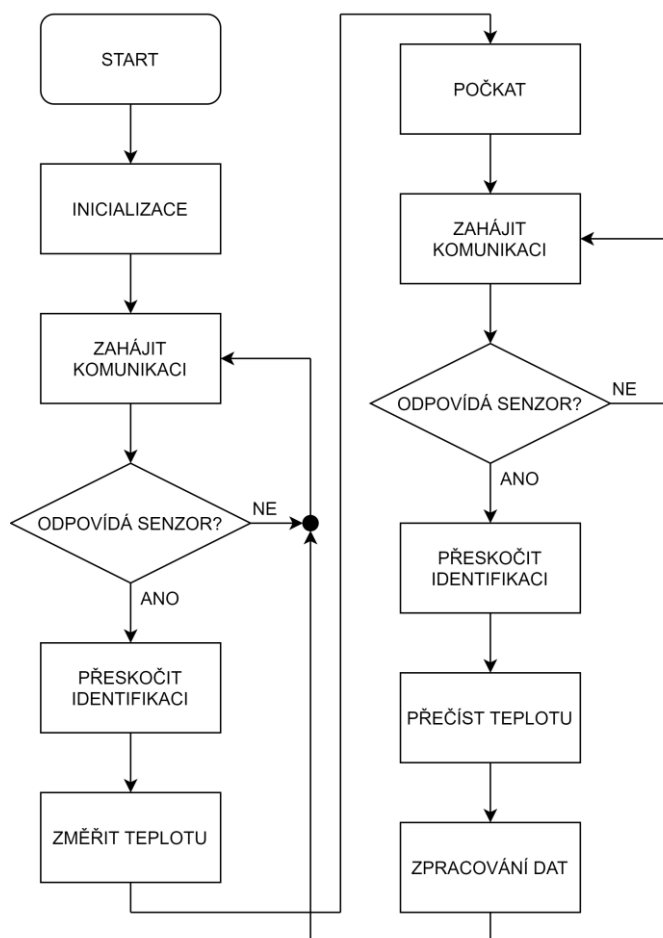
Při tvorbě programů a knihoven byl použit katalogový list programovaného mikrokontroléru (PIC32MX530F128H), příručka pro překladač XC32, referenční manuály a další zdroje [22][30][42][43][44][45][46][47][48][49][50]. Pokud to bylo možné, byly pro jednoduchost převzaty názvy funkcí z knihoven používaných v předmětu BPC-MAM. Většinu vzorových programů (kromě těch pracujících se sběrnicemi 1-Wire a I2C) lze popsat pomocí vývojových diagramů na obrázku 63. Po inicializaci jsou data buď v určitých intervalech jen odesílána (vlevo), nebo vývojový přípravek jen čeká na jejich přijetí, následně je nějakým způsobem zpracuje (vpravo).

Vývojový diagram pro program operující se sběrnicí 1-Wire a teplotním snímačem DS18B20 je zobrazen na obrázku 64. Komunikace s touto periferií probíhá vždy v cyklu zahájit komunikaci – ROM příkaz – příkaz pro zařízení [20]. Protože je snímač jediným připojeným slave obvodem, je možné přeskočit jeho identifikaci. Mezitím, co je měřena teplota, musí MCU buď počkat (tento případ), nebo se dotazovat, zda je měření dokončeno. Algoritmus popisující komunikaci mikrokontroléru a paměti EEPROM AT24C02C přes sběrnici I2C je zobrazen

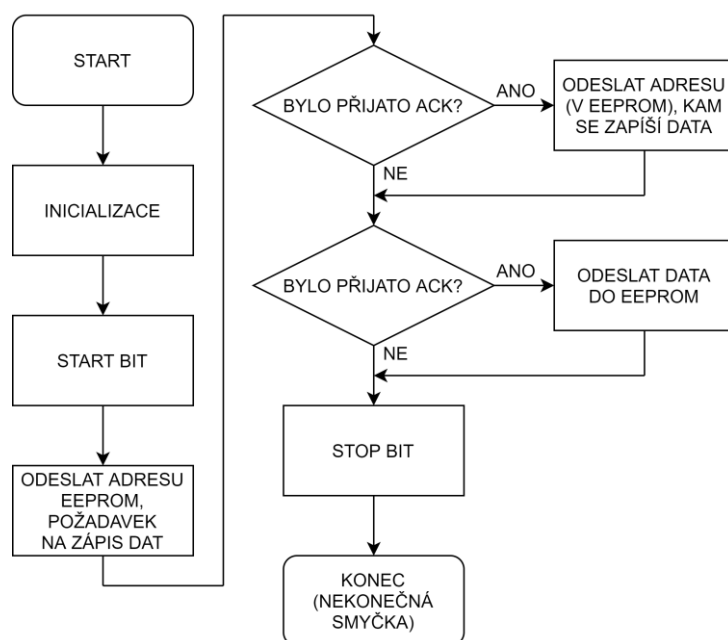
na obrázcích 65 (zápis jednoho bajtu dat na libovolnou adresu) a 66 (čtení jednoho bajtu dat z libovolné adresy) [35].



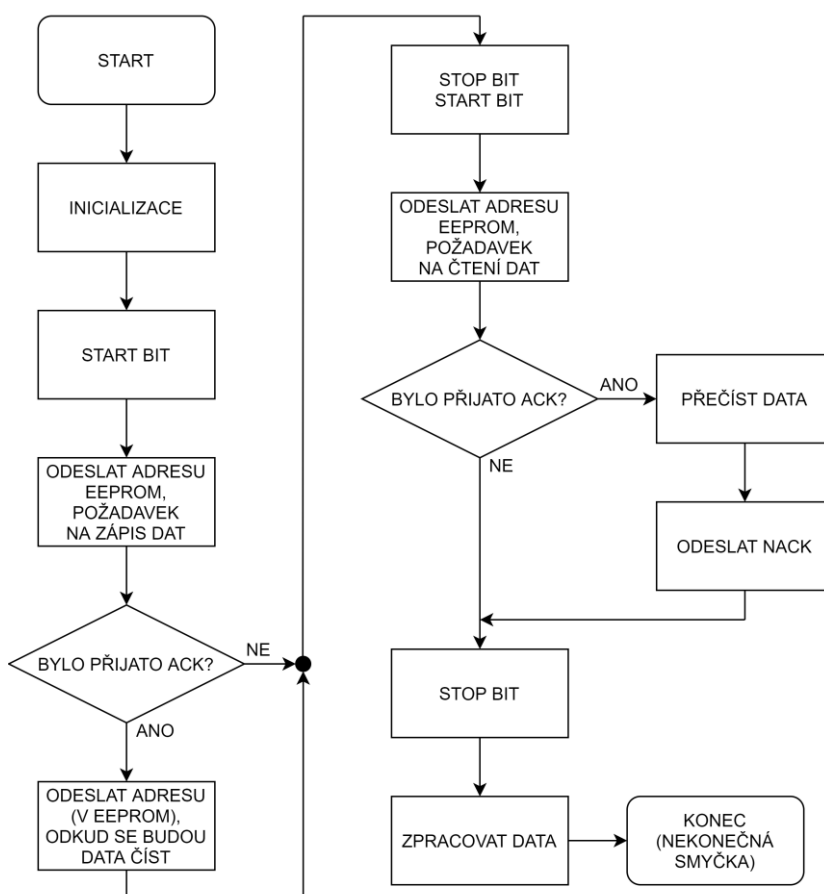
Obrázek 63: Vývojové diagramy pro většinu programů



Obrázek 64: Vývojový diagram pro sběrnici 1-Wire



Obrázek 65: Vývojový diagram pro sběrnici I2C – zápis dat



Obrázek 66: Vývojový diagram pro sběrnici I2C – čtení dat

Ověření funkčnosti vzorových programů je provedeno ve třetí kapitole.

5 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce je návrh a realizace laboratorního přípravku (včetně laboratorních úloh), který bude vhodný pro výuku a demonstraci sběrnic. V rámci teoretického rozboru tématu byly nejprve popsány základní pojmy jako například simplexní a duplexní komunikační kanály, paralelní a sériový přenos dat či přenosová rychlost, dále bylo uvedeno stručné rozdělení sběrnic. Byla nastíněna i problematika obvodového řešení – funkce otevřeného kolektoru/drainu, princip funkce budičů, zakončovací rezistory. Pozornost byla věnována sběrnicím UART, RS-485, I2C, SPI, 1-Wire, CAN a proudové smyčce. Dále byla diskutována možnost přenosu dat pomocí infračerveného světla. Průběhy přenosu dat jsou ilustrovány na obrázcích.

Následně byl proveden obvodový návrh zařízení. Jako první bylo potřeba vymyslet jeho koncept – jedná se o vývojový kit, který může sloužit i pro výuku programování. Jednotlivé desky mohou komunikovat s vlastními periferiemi (například senzor teploty), mezi sebou a popřípadě i s jinými externími rozšířeními (například Bluetooth modul). Lze testovat vliv použitých kabelů a okolního rušení na funkci zařízení, včetně práce pull-up rezistorů. Po volbě vhodných komponentů a jejich správném zapojení byl ke každé sběrnici přidán takový počet konektorů, aby bylo možné přípravek propojovat a současně provádět měření. Pro možnost interakce s přípravkem byl přidán displej, sběrnice USB, čtyři LED a čtyři tlačítka.

Výsledkem je schéma zapojení, ze kterého byl vytvořen dvouvrstvý návrh desky plošných spojů. DPS byla vyrobena u zahraničního výrobce a autorem ručně osazena. Dalším krokem bylo oživení celého zařízení včetně testování funkčnosti. Práce se dále zabývá návrhem laboratorních úloh – sadou vzorových programů a knihoven se základními funkcemi pro obsluhu hlavních částí vývojového přípravku. Laboratorní úlohy, schéma zapojení navrhovaného zařízení a podklady pro výrobu DPS jsou přiloženy v elektronické příloze práce.

Zadání této práce bylo splněno – přípravek byl úspěšně navrhnout a zrealizován. Jako možné rozšíření do budoucna byla nad rámec požadavků přidána i sběrnice USB a slot pro SD kartu. Vzhledem k faktu, že finální verze zařízení je vlastně i jeho první prototyp, který navíc neprošel žádným větším testováním v praxi (v reálné výuce), bylo by vhodné v budoucnu odstranit případné nedokonalosti, které vyplynou na povrch až s časem. Mezi přednosti výsledného designu patří jeho přehlednost, jednoduchost, univerzálnost a kompaktní rozměry, ale především to, že pro jeho provoz lze využít již stávající vybavení školních laboratoří.

LITERATURA

- [1] **SMĚKAL, Z.** *Analýza signálů a soustav – BASS* [elektronický dokument]. VUT Brno, 2012 [cit. 11. 12. 2019]. ISBN 978-80-214-4453-9
- [2] Analogový a digitální přenos. In: *Portál e-MiŠ: Martin Šimůnek*. [online]. 14. 11. 2016, 7:33 [cit. 7. 12. 2019]. Dostupné z: http://mis.e-mis.cz/index.php/Analogov%C3%BD_a_digit%C3%A1ln%C3%AD_p%C5%99enos
- [3] **GOOK, Michael.** *Hardwarová rozhraní: průvodce programátora*. Brno: Computer Press, 2006. Hardware (Computer Press). ISBN 80-251-1019-2.
- [4] **LEVEK, V.** *Nová hybridní jednovodičová sběrnice pro mikroelektronické systémy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2019. 161 s. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.
- [5] **PETERKA, Jiří.** Duplex, Simplex. In: *eArchiv.cz: Archiv článků a přednášek Jiřího Peterky*. [online]. [cit. 7. 12. 2019]. Dostupné z: <https://www.earchiv.cz/a92/a245c120.php3>
- [6] **TIŠNOVSKÝ, Pavel.** Interní sběrnice PCI Express. In: *Root.cz: Informace nejen ze světa Linuxu*. [online]. 30. 10. 2008 [cit. 7. 12. 2019]. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/interni-sbernice-pci-express/>
- [7] **PETERKA, Jiří.** Detekce chyb. In: *eArchiv.cz: Archiv článků a přednášek Jiřího Peterky*. [online]. [cit. 9. 12. 2019]. Dostupné z: <https://www.earchiv.cz/a95/a523k130.php3>
- [8] **PETERKA, Jiří.** CRC. In: *eArchiv.cz: Archiv článků a přednášek Jiřího Peterky*. [online]. [cit. 9. 12. 2019]. Dostupné z: <https://www.earchiv.cz/a95/a523k130.php3>
- [9] **DŘÍNOVSKÝ, J.** *Elektromagnetická kompatibilita*. Přednášky ver. 2017/10/06 [elektronický dokument]. **Frýza, Tomáš; Růžek, Václav a Zachar, Jiří.** V Brně: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2017 [cit. 11. 12. 2019].
- [10] Komunikace pro sběrnici. In: *Mendelova univerzita v Brně*. [online]. [cit. 9. 12. 2019]. Dostupné z: https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=9947
- [11] **PETERKA, Jiří.** Synchronní, asynchronní a arytmičkový přenos. In: *eArchiv.cz: Archiv článků a přednášek Jiřího Peterky*. [online]. [cit. 8. 12. 2019]. Dostupné z: <https://www.earchiv.cz/a96/a650k150.php3>
- [12] **res.** MCU: protokol UART. In: *ATHAJ.CZ*. [online]. 22. 3. 2016, 9:24 [cit. 9. 12. 2019]. Dostupné z: http://src.athaj.cz/teaching/rev/arch_uart
- [13] **Dudka, Michal.** USART u AVR 1. Díl – Teoretický popis. In: *Tajned – .NET and Embedded Development*. [online]. [cit. 9. 12. 2019]. Dostupné z: <http://www.tajned.cz/2016/09/usart-u-avr-1-dil-teoreticky-popis/>

- [14] **TEDIA spol. s r. o.** Obecné vlastnosti komunikačních prostředků. In: *TEDIA® – vývoj a výroba elektroniky pro laboratorní a průmyslové aplikace*. [online]. 30. 11. 2018 [cit. 9. 12. 2019]. Dostupné z: <https://www.tedia.cz/podpora/komunikace-obecne-vlastnosti.html>
- [15] **Poucha, Pavel.** Komunikace pro průmyslových linkách RS485 a RS422. In: *Papouch – průmyslová elektronika a měřicí systémy*. [online]. [cit. 9. 12. 2019]. Dostupné z: <https://papouch.com/komunikace-pro-prumyslovych-linkach-rs485-a-rs422-p3735/>
- [16] **SKALICKÝ, Petr.** *Přístrojové aplikace mikropočítačů*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-03111-x.
- [17] TWI Bus. In: *I2C BUS*. [online]. [cit. 11. 12. 2019]. Dostupné z: <https://www.i2c-bus.org/twi-bus/>
- [18] **Redakce HW serveru.** Stručný popis sběrnice I2C a její praktické využití k připojení externí eeprom 24LC256 k mikrokontroléru PIC16F877. In: *vyvoj.hw.cz*. [online]. 20. 5. 2000, 0:00 [cit. 10. 12. 2019]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/navrh-obvodu/strucny-popis-sbernice-i2c-a-jeji-prakticke-vyuziti-k-pripojeni-externi-eeprom-24lc256>
- [19] **Texas Instruments.** *1-Wire Enumeration*. Application Report [elektronický dokument]. SPMA057C, srpen 2013, revize leden 2018 [cit. 12. 12. 2019]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/spma057c/spma057c.pdf>
- [20] **Maxim Integrated.** *DS18B20*. Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer [elektronický dokument]. 19-7487, revize 6, červenec 2019 [cit. 12. 12. 2019]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>
- [21] **Redakce HW serveru.** Aplikování sběrnice CAN. In: *vyvoj.hw.cz*. [online]. 9. 11. 2004, 0:00 [cit. 12. 12. 2019]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/navrh-obvodu/rozhrani/aplikovani-sbernice-can.html>
- [22] **Microchip Technology.** *Section 34. Controller Area Network (CAN)*. [elektronický dokument]. DS61154C. 29. 11. 2011 [cit. 28. 5. 2020]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/61154C.pdf>
- [23] **Vojáček, Antonín.** Proudová smyčka 4-20 mA – obecný popis. In: *automatizace.hw.cz* [online]. 6. 6. 2014, 22:15 [cit. 10. 12. 2019]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/proudova-smycka-4-20-ma-obecny-popis>
- [24] **Redakce HW serveru.** Teorie datového IR přenosu. In: *vyvoj.hw.cz*. [online]. 17. 12. 1998, 0:00 [cit. 1. 6. 2020]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/teorie-datoveho-ir-prenosu.html>
- [25] **Redakce HW serveru.** IrDa – Kompletní popis. In: *vyvoj.hw.cz*. [online]. 13. 10. 1998, 0:00 [cit. 1. 6. 2020]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/irda-kompletni-popis.html>
- [26] **Boušek, Jaroslav.** *Elektronické součástky*. Skriptum [elektronický dokument]. **Kosina, Petr a Mojrová, Barbora.** Leden 2015 [cit. 10. 12. 2019].

- [27] **Littelfuse**. *POLYSWITCH RESETTABLE DEVICES*. [elektronický dokument]. 2016
[cit. 13. 12. 2019]. Dostupné z:
https://cz.mouser.com/datasheet/2/240/Littelfuse_PTC_MINISMD_Catalog_Datasheet.pdf-1021725.pdf
- [28] **Diotec Semiconductor**. *SUF4001 ... SUF4007*. [elektronický dokument]. Verze 28. 10. 2015
[cit. 13. 12. 2019]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.917-024.1.pdf>
- [29] **MPS**. *MP1469*. [elektronický dokument] Revize 1.01. 26. 8. 2013 [cit. 13. 12. 2019]. Dostupné z:
https://www.monolithicpower.com/en/documentview/productdocument/index/version/2/document_type/Datasheet/lang/en/sku/MP1469/document_id/324
- [30] **Microchip Technology**. *PIC32MX1XX/2XX/5XX 64/100-PIN*. [elektronický dokument]. DS60001290F. 14. 5. 2019 [cit. 13. 12. 2019]. Dostupné z:
http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/PIC32MX1XX2XX5XX%2064100-PIN_Family_60001290F.pdf
- [31] **Microchip Technology**. *Using MPLAB® ICD 3*. [elektronický dokument]. [cit. 13. 12. 2019]. Dostupné z: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/DS-51765C.pdf>
- [32] **ELECTRONIC ASSEMBLY**. *DOG SERIES 3.3V*. [elektronický dokument]. Srpen 2012 [cit. 13. 12. 2019]. Dostupné z:
<https://www.tme.eu/Document/4a84a7a5b14a7b21285e4453a3089fea/EA%20DOGM081B-A.pdf>
- [33] **STMicroelectronics**. *USBL6-2*. [elektronický dokument]. ID 11265, revize 5. Říjen 2011 [cit. 13. 12. 2019]. Dostupné z:
<https://cz.mouser.com/datasheet/2/389/usblc6-2-957370.pdf>
- [34] **STMicroelectronics**. *ST3485EB ST3485EC*. [elektronický dokument]. Revize 5. Listopad 2007 [cit. 13. 12. 2019]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.959-378.1.pdf>
- [35] **Atmel Corporation**. *AT24C01C and AT24C02C*. [elektronický dokument]. Revize Atmel-8700H-EEPROM-AT24C01C-02C-Datasheet_122016. 2015 [cit. 13. 12. 2019]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.943-058.1.pdf>
- [36] **Texas Instruments**. *SN65HVD23x 3.3-V CAN Bus Transceivers*. [elektronický dokument]. SLOS346O. Duben 2018 [cit. 13. 12. 2019]. Dostupné z:
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn65hvd230.pdf>
- [37] **Nexperia**. *PMV65XP*. 20 V, single P-channel Trench MOSFET [elektronický dokument]. 12. 2. 2013 [cit. 28. 5. 2020]. Dostupné z:
<https://assets.nexperia.com/documents/data-sheet/PMV65XP.pdf>
- [38] **Nexperia**. *NX7002AK*. 60 V, single N-channel Trench MOSFET [elektronický dokument]. 6. 8. 2015 [cit. 28. 5. 2020]. Dostupné z:
<https://assets.nexperia.com/documents/data-sheet/NX7002AK.pdf>

- [39] **OSRAM Opto Semiconductors.** *LD 271, LD 271 H, LD 271 L, LD 271 LH.* [elektronický dokument]. Verze 1.0. 4. 4. 2007 [cit. 13. 12. 2019]. Dostupné z: https://cz.mouser.com/datasheet/2/311/osram%20opto%20semiconductor_ld%20271%20lead%20pb%20free%20produ-1196480.pdf
- [40] **Vishay Intertechnology.** *TSOP582., TSOP584...* [elektronický dokument]. 82461, revize 1.7. 26. 9. 2018 [cit. 13. 12. 2019]. Dostupné z: <https://www.vishay.com/docs/82461/tsop582.pdf>
- [41] **JLPCB.COM.** *JLPCB. PROTOTYPE AND SMALL SERIES Reliable PCB Services* [online]. 2020 [cit. 28. 5. 2020]. Dostupné z: <https://jlcpcb.com/>
- [42] **Microchip Technology.** *MPLAB® XC32 C/C++ Compiler User's Guide.* [elektronický dokument]. DS50001686J. 14. 7. 2015 [cit. 28. 5. 2020]. 978-1-5224-0679-2 Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/50001686J.pdf>
- [43] **Microchip Technology.** *Section 12. I/O Ports.* [elektronický dokument]. DS60001120F. 27. 1. 2015 [cit. 28. 5. 2020]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/60001120F.pdf>
- [44] **Microchip Technology.** *Section 8. Interrupts.* [elektronický dokument]. DS60001108H. 27. 1. 2015 [cit. 28. 5. 2020]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/60001108H.pdf>
- [45] **Microchip Technology.** PIC32MX Interrupt and Exception Usage. In: *Microchip Developer Help.* [online]. [cit. 28. 5. 2020]. Dostupné z: <https://microchipdeveloper.com/32bit:mx-arch-exceptions-usage>
- [46] **Microchip Technology.** *Section 17. 10-bit Analog-to-Digital Converter (ADC).* [elektronický dokument]. DS61104E. 2. 8. 2011 [cit. 28. 5. 2020]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/61104E.pdf>
- [47] **Microchip Technology.** *Section 21. UART.* [elektronický dokument]. DS60001107H. 7. 11. 2016 [cit. 28. 5. 2020]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/60001107H.pdf>
- [48] **Microchip Technology.** *Section 23. Serial Peripheral Interface (SPI).* [elektronický dokument]. DS61106G. 2. 8. 2011 [cit. 28. 5. 2020]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/61106G.pdf>
- [49] **Microchip Technology.** *Section 24. Inter-Integrated Circuit™ (I2C™).* [elektronický dokument]. DS61116F. 29. 11. 2012 [cit. 28. 5. 2020]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/61116f.pdf>
- [50] **Sitronix.** *ST7036. Dot Matrix LCD Controller/Driver* [elektronický dokument]. V1.1. 24. 12. 2003 [cit. 28. 5. 2020]. Dostupné z: <https://www.lcd-module.de/eng/pdf/zubehoer/st7036.pdf>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Kroucená dvojlinka (twisted pair)	5
Obrázek 2: Zapojení push-pull	6
Obrázek 3: Otevřený kolektor (vlevo), otevřený drain (vpravo)	6
Obrázek 4: Sběrnice UART	7
Obrázek 5: Průběh komunikace na sběrnici UART – 1	8
Obrázek 6: Průběh komunikace na sběrnici UART – 2	8
Obrázek 7: Budič sběrnice RS-485	9
Obrázek 8: Sběrnice RS-485	9
Obrázek 9: Aktivní zakončovací impedance sběrnice RS-485	10
Obrázek 10: Průběh komunikace na sběrnici RS-485.....	10
Obrázek 11: Sběrnice I2C	11
Obrázek 12: Průběh komunikace na sběrnici I2C – 1	12
Obrázek 13: Průběh komunikace na sběrnici I2C – 2	12
Obrázek 14: Sběrnice SPI	14
Obrázek 15: Průběh komunikace na sběrnici SPI	15
Obrázek 16: Sběrnice 1-Wire	16
Obrázek 17: Sběrnice 1-Wire, parazitní režim	16
Obrázek 18: Průběh komunikace na sběrnici 1-Wire.....	17
Obrázek 19: Sběrnice CAN	18
Obrázek 20: Budič sběrnice CAN	19
Obrázek 21: Průběh komunikace na sběrnici CAN	19
Obrázek 22: Datový rámec s 11bitovou adresou	20
Obrázek 23: Proudová smyčka.....	21
Obrázek 24: IČ přenos.....	22
Obrázek 25: Průběh komunikace přes IČ přenos	22
Obrázek 26: Návrh laboratorního přípravku	23
Obrázek 27: Blokové schéma.....	24
Obrázek 28: Schéma zapojení – zdroj.....	25

Obrázek 29: Schéma zapojení – mikrokontrolér.....	27
Obrázek 30: Schéma zapojení – programátor	28
Obrázek 31: Schéma zapojení – displej	29
Obrázek 32: Schéma zapojení – LED	29
Obrázek 33: Schéma zapojení – tlačítka	30
Obrázek 34: Schéma zapojení – USB	31
Obrázek 35: Schéma zapojení – UART	32
Obrázek 36: Schéma zapojení – RS-485.....	32
Obrázek 37: Schéma zapojení – I2C	33
Obrázek 38: Schéma zapojení – SPI	33
Obrázek 39: Schéma zapojení – 1-Wire.....	34
Obrázek 40: Schéma zapojení – CAN.....	34
Obrázek 41: Propojení dvou přípravků pomocí proudové smyčky.....	35
Obrázek 42: Schéma zapojení – proudová smyčka.....	36
Obrázek 43: Schéma zapojení – infračervený přenos dat	37
Obrázek 44: Návrh DPS – horní strana, měřítko M1,5:1	38
Obrázek 45: Návrh DPS – spodní strana, měřítko M1,5:1.....	39
Obrázek 46: Osazení desky plošných spojů – horní strana.....	40
Obrázek 47: Osazení desky plošných spojů – spodní strana.....	40
Obrázek 48: Časová závislost napětí na sběrnici UART	41
Obrázek 49: Časová závislost (rozdílu) napětí na sběrnici RS-485	42
Obrázek 50: Časová závislost napětí na sběrnici SPI	42
Obrázek 51: Časová závislost napětí na infračervené diodě a na výstupu přijímače.....	43
Obrázek 52: Detail časové závislosti napětí na infračervené diodě a na výstupu přijímače.....	43
Obrázek 53: Časová závislost napětí (proudu) zdroje proudové smyčky	44
Obrázek 54: Časová závislost napětí na sběrnici 1-Wire – inicializace komunikace	44
Obrázek 55: Časová závislost napětí na sběrnici 1-Wire – příkazy	45
Obrázek 56: Časová závislost napětí na sběrnici I2C – zápis dat 1	45
Obrázek 57: Časová závislost napětí na sběrnici I2C – zápis dat 2	46
Obrázek 58: Časová závislost napětí na sběrnici I2C – zápis dat 3	46
Obrázek 59: Časová závislost napětí na sběrnici I2C – čtení dat 1.....	47

Obrázek 60: Časová závislost napětí na sběrnici I2C – čtení dat 2.....	47
Obrázek 61: Časová závislost napětí na sběrnici CAN.....	48
Obrázek 62: Ukázka pracoviště pro práci s přípravkem	49
Obrázek 63: Vývojové diagramy pro většinu programů.....	50
Obrázek 64: Vývojový diagram pro sběrnici 1-Wire.....	50
Obrázek 65: Vývojový diagram pro sběrnici I2C – zápis dat	51
Obrázek 66: Vývojový diagram pro sběrnici I2C – čtení dat	51

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Napěťové úrovně sběrnice RS-485	10
Tabulka 2: Konfigurační bity sběrnice SPI.....	13
Tabulka 3: Odhad spotřeby laboratorního přípravku	25
Tabulka 4: Požadavky na mikrokontrolér	28

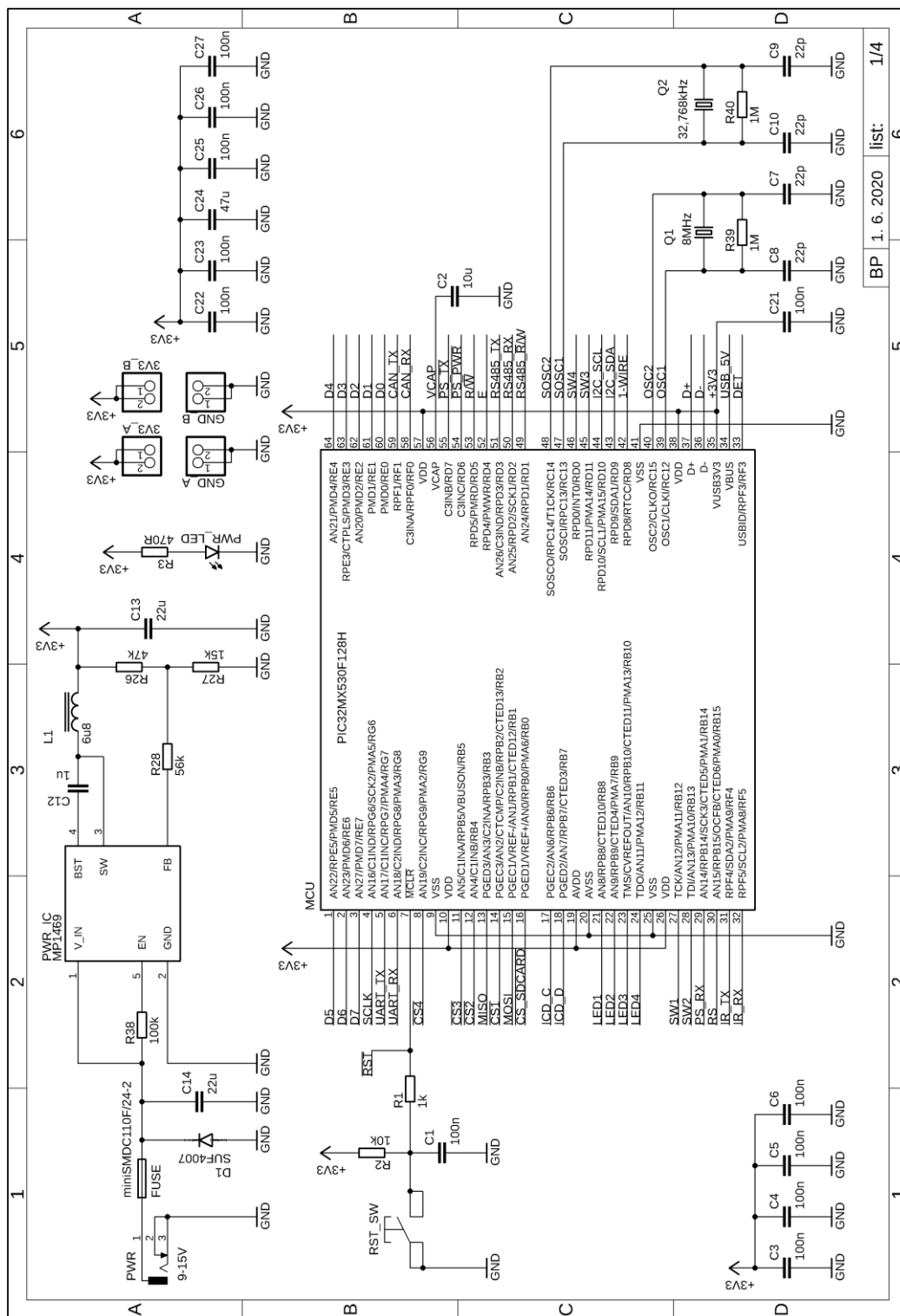
SEZNAM ZKRATEK

ACK	acknowledgement – potvrzení
ADC	analog to digital converter – analogově digitální převodník
CAN	Controller area network – sběrnice
CRC	cyclic redundancy check – cyklický redundantní součet
DLC	data length code – pole bitů v rámci sběrnice CAN
DPS	deska plošných spojů
EEPROM	electrically erasable programmable read only memory – typ paměti
EMC	electromagnetic compatibility – elektromagnetická kompatibilita
EOF	end of frame – konec rámce
FPGA	field programmable gate array – programovatelné hradlové pole
GPIO	general purpose input/output – vstupně-výstupní pin pro obecné použití
HASL	hot air solder leveling – typ povrchové úpravy desek plošných spojů
I2C	Inter-integrated-circuit – sběrnice
IČ	infračervený
IDE	extended identifier – bit v rámci sběrnice CAN
IoT	Internet of Things – Internet věcí
IR	infrared – infračervený
LCD	liquid crystal display – displej z tekutých krystalů
LED	light emitting diode – elektroluminiscenční dioda
LSB	least significant bit – nejméně významný bit
MCU	mikrokontrolér
MISO	master in, slave on – vodič sběrnice SPI
MOSI	master on, slave in – vodič sběrnice SPI
MSB	most significant bit – nejvíce významný bit
NACK	negative acknowledgement – negativní potvrzení
RB0	reserved bit 0 – bit v rámci sběrnice CAN
RFID	radio frequency identification – bezdrátová technologie identifikace
RS-485	Recommended standard 485 – sběrnice
RTR	remote transmission request – bit v rámci sběrnice CAN

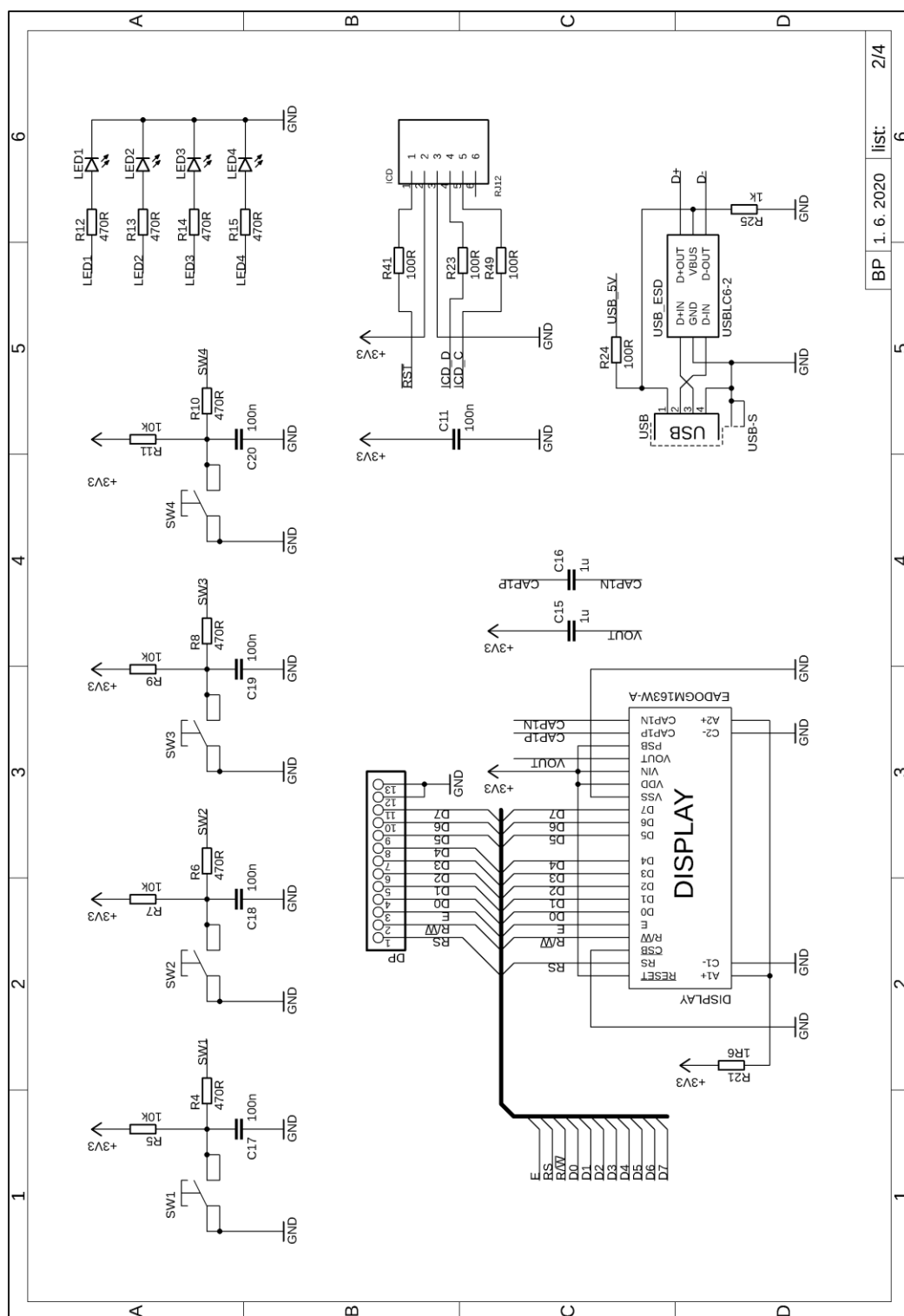
RX	receiver – přijímač
SCL	serial clock – vodič sběrnice I2C
SCLK	serial clock – vodič sběrnice SPI
SDA	serial data – vodič sběrnice I2C
SOF	start of frame – začátek rámce
SPI	Serial peripheral interface – sběrnice
SS/CS	slave select/chip select – vodič sběrnice SPI
TWI	Two wire interface – sběrnice
TX	transceiver – vysílač
UART	Universal asynchronous receiver/transmitter – univerzální asynchronní přijímač/vysílač
USB	Universal serial bus – sběrnice
VGA	Video graphics array – standard pro zobrazovací techniku

A SCHÉMA ZAPOJENÍ

A.1 List 1

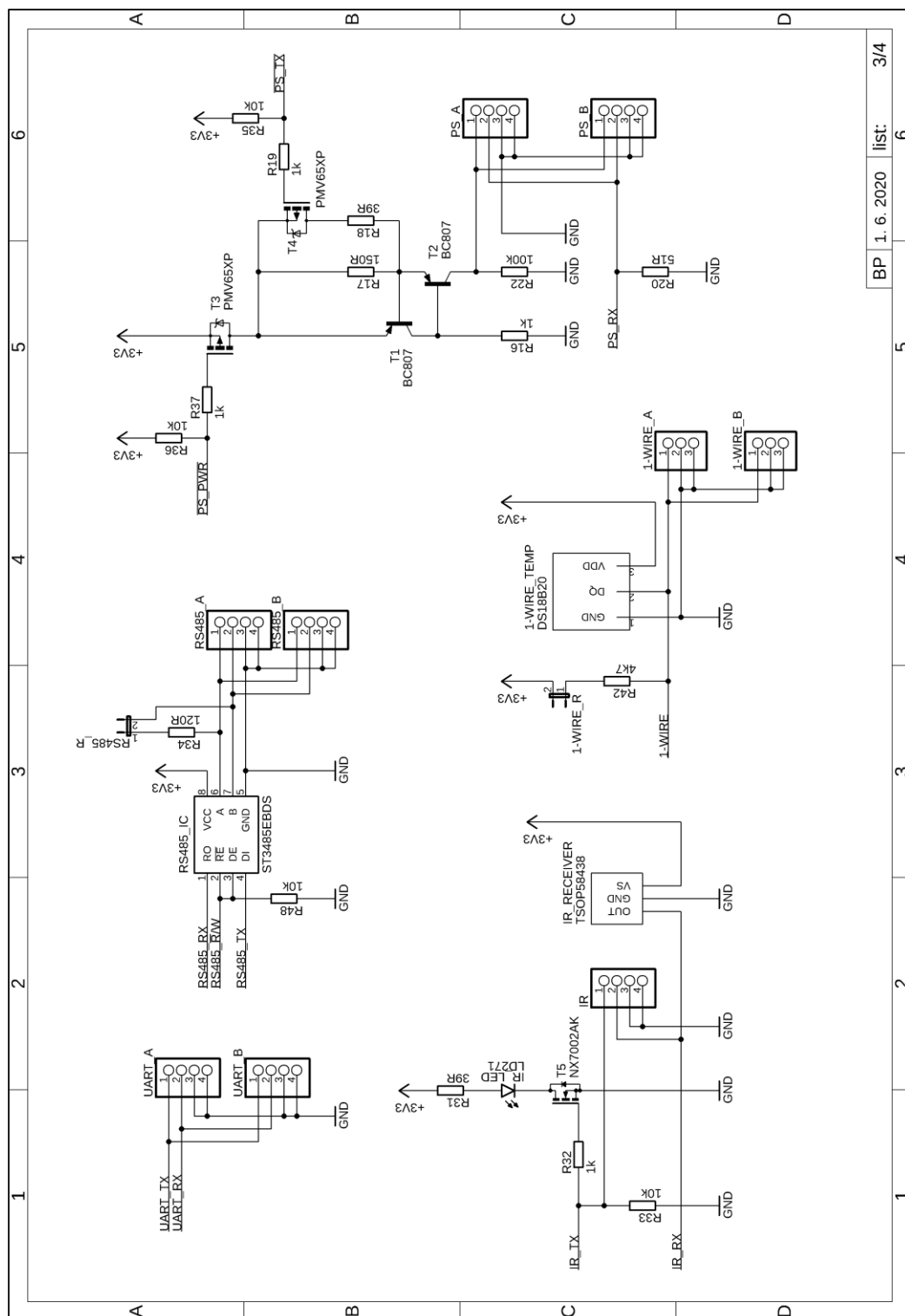


A.2 List 2



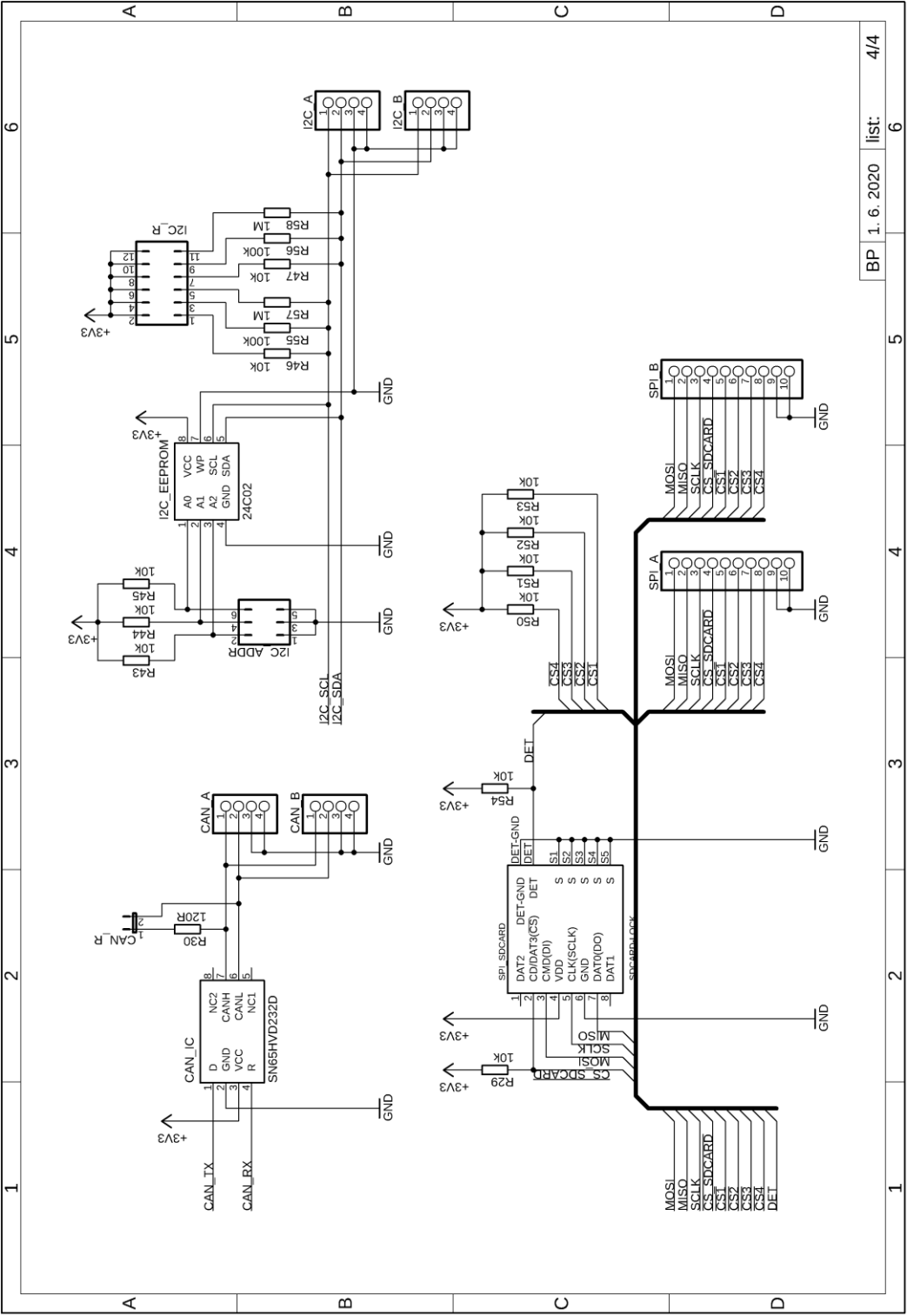
BP 1. 6. 2020 list: 2/4

A.3 List 3



BP 1. 6. 2020 list: 3/4

A.4 List 4



B SEZNAM SOUČÁSTEK

označení	hodnota	pouzdro	popis
R1	1k	R0805	rezistor
R2	10k	R0805	rezistor
R3	470R	R0805	rezistor
R4	470R	R0805	rezistor
R5	10k	R0805	rezistor
R6	470R	R0805	rezistor
R7	10k	R0805	rezistor
R8	470R	R0805	rezistor
R9	10k	R0805	rezistor
R10	470R	R0805	rezistor
R11	10k	R0805	rezistor
R12	470R	R0805	rezistor
R13	470R	R0805	rezistor
R14	470R	R0805	rezistor
R15	470R	R0805	rezistor
R16	1k	R0805	rezistor
R17	150R	R0805	rezistor
R18	39R	R0805	rezistor
R19	1k	R0805	rezistor
R20	51R	R0805	rezistor
R21	1R6	R0805	rezistor
R22	100k	R0805	rezistor
R23	100R	R0805	rezistor
R24	100R	R0805	rezistor
R25	1k	R0805	rezistor
R26	47k	R0805	rezistor
R27	15k	R0805	rezistor
R28	56k	R0805	rezistor
R29	10k	R0805	rezistor
R30	120R	R0805	rezistor
R31	39R	R0805	rezistor
R32	1k	R0805	rezistor
R33	10k	R0805	rezistor
R34	120R	R0805	rezistor
R35	10k	R0805	rezistor
R36	10k	R0805	rezistor
R37	1k	R0805	rezistor
R38	100k	R0805	rezistor
R39	1M	R0805	rezistor
R40	1M	R0805	rezistor
R41	100R	R0805	rezistor

R42	4k7	R0805	rezistor
R43	10k	R0805	rezistor
R44	10k	R0805	rezistor
R45	10k	R0805	rezistor
R46	10k	R0805	rezistor
R47	10k	R0805	rezistor
R48	10k	R0805	rezistor
R49	100R	R0805	rezistor
R50	10k	R0805	rezistor
R51	10k	R0805	rezistor
R52	10k	R0805	rezistor
R53	10k	R0805	rezistor
R54	10k	R0805	rezistor
R55	100k	R0805	rezistor
R56	100k	R0805	rezistor
R57	1M	R0805	rezistor
R58	1M	R0805	rezistor
C1	100n	C0805	keramický kondenzátor
C2	10u	C0805	keramický kondenzátor
C3	100n	C0805	keramický kondenzátor
C4	100n	C0805	keramický kondenzátor
C5	100n	C0805	keramický kondenzátor
C6	100n	C0805	keramický kondenzátor
C7	22p	C0805	keramický kondenzátor
C8	22p	C0805	keramický kondenzátor
C9	22p	C0805	keramický kondenzátor
C10	22p	C0805	keramický kondenzátor
C11	100n	C0805	keramický kondenzátor
C12	1u	C0805	keramický kondenzátor
C13	22u	C0805	keramický kondenzátor
C14	22u	C0805	keramický kondenzátor
C15	1u	C0805	keramický kondenzátor
C16	1u	C0805	keramický kondenzátor
C17	100n	C0805	keramický kondenzátor
C18	100n	C0805	keramický kondenzátor
C19	100n	C0805	keramický kondenzátor
C20	100n	C0805	keramický kondenzátor
C21	100n	C0805	keramický kondenzátor
C22	100n	C0805	keramický kondenzátor
C23	100n	C0805	keramický kondenzátor
C24	47u	C0805	keramický kondenzátor
C25	100n	C0805	keramický kondenzátor
C26	100n	C0805	keramický kondenzátor
C27	100n	C0805	keramický kondenzátor
L1	6u8	L	cívka

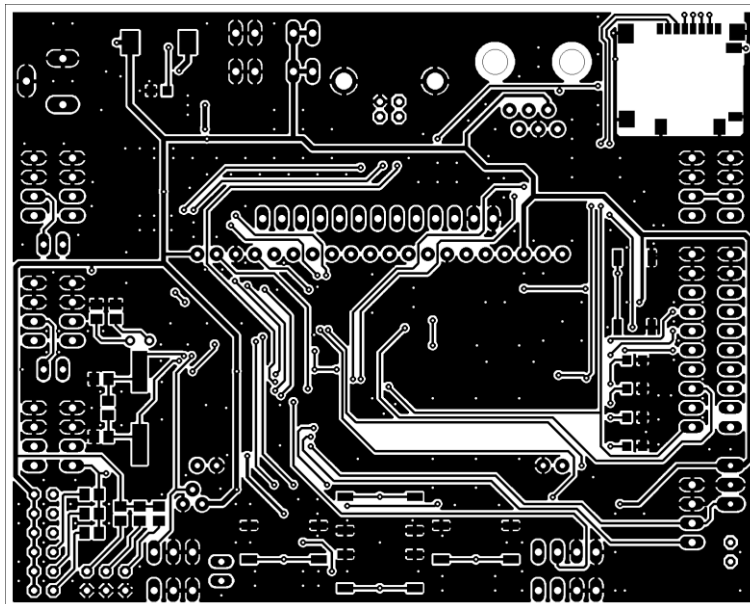
LED1	oranžová	CHIPLED_0805	LED
LED2	oranžová	CHIPLED_0805	LED
LED3	oranžová	CHIPLED_0805	LED
LED4	oranžová	CHIPLED_0805	LED
PWR_LED	červená	CHIPLED_0805	LED
RST_SW	-	SWITCH	tlačítko
SW1	-	SWITCH	tlačítko
SW2	-	SWITCH	tlačítko
SW3	-	SWITCH	tlačítko
SW4	-	SWITCH	tlačítko
PWR	-	DCJ0202	konektor
D1	SUF4007	MELF-MLL41	dioda
FUSE	miniSMDC110F/24-2	C1812K	vratná pojistka
PWR_IC	MP1469	SOT23-6	spínaný zdroj
3V3_A	-	1X02	konektor
3V3_B	-	1X02	konektor
GND_A	-	1X02	konektor
GND_B	-	1X02	konektor
MCU	PIC32MX530F128H	TQFP64-10X10	mikrokontrolér
Q1	8MHz	HC49UP	krystal
Q2	32,768kHz	TC38H	krystal
ICD	-	RJ12	konektor
DISPLAY	EADOGM163W-A	EADOGM163W-A	displej
DP	-	1X13	konektor
T1	BC807	SOT23-BEC	PNP tranzistor
T2	BC807	SOT23-BEC	PNP tranzistor
T3	PMV65XP	MICRO3	P MOSFET, indukovaný kanál
T4	PMV65XP	MICRO3	P MOSFET, indukovaný kanál
T5	NX7002AK	SOT23	N MOSFET, indukovaný kanál
UART_A	-	1X04	konektor
UART_B	-	1X04	konektor
RS485_IC	ST3485EBDS	SOIC8	budič/převodník UART RS-485
RS485_A	-	1X04	konektor
RS485_B	-	1X04	konektor
RS485_R	-	JP1	jumper
I2C_EEPROM	24C02	SOIC8	EEPROM
I2C_A		1X04	konektor
I2C_B		1X04	konektor
I2C_R		JP6Q	jumper
I2C_ADDR		JP3Q	jumper
SPI_SDCARD	-	SDCARD	konektor

SPI_A	-	1X10	konektor
SPI_B	-	1X10	konektor
1-WIRE_TEMP	DS18B20	TO92	snímač teploty
1-WIRE_A	-	1X03	konektor
1-WIRE_B	-	1X03	konektor
1-WIRE_R	-	JP1	jumper
CAN_IC	SN65HVD232D	SOIC8	budič CAN
CAN_A	-	1X04	konektor
CAN_B	-	1X04	konektor
CAN_R	-	JP1	jumper
PS_A	-	1X04	konektor
PS_B	-	1X04	konektor
IR_LED	LD271	LED5MM	IČ LED
IR_RECEIVER	TSOP58438	TSOP58438	IČ přijímač
IR	-	1X04	konektor
USB_ESD	USBL6-2	SOT23-6	USB ESD ochrana
USB	-	PN61729-S	konektor

C DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ

Rozměry desky 100 × 80 mm, měřítko M1:1.

C.1 Horní strana



C.2 Spodní strana

